

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки
електростанцій» спеціальності G4 «Енерговиробництво».*

Укладач: А.П. Бовсуновський

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2025

УДК 519.21 (075.8)

Б72

Укладач: Бовсуновський Анатолій Петрович, д-р техн. наук, проф.
Відповідальний редактор: Фуртат Ірина Едуардівна, доц., к.т.н., доцент каф. ТАЕ
Рецензент: Крищук Микола Георгійович, проф., д.т.н., професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 2 від 06.11.2025 р.)*

*за поданням методичної комісії Навчально-наукового інституту атомної та
теплової енергетики
(протокол № 2 від 31.10.2025)*

Б 72 Надійність енергетичного обладнання. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спец. G4 Енерговиробництво / КПІ ім. Ігоря Сікорського уклад.: А. П. Бовсуновський – Електрон. текст. дані (1 файл: 8,06 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 240 с.

Викладено основи методів оцінки надійності енергетичного обладнання і практичні заходи для підтримання його надійності. Матеріали навчального посібника відповідають навчальній програмі дисципліни «Надійність енергетичного обладнання» і забезпечують дисципліни «Діагностика теплоенергетичного устаткування» і «Експлуатація енергетичного обладнання».

Для студентів ННІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, які навчаються за спеціальністю G4 «Енерговиробництво».

УДК 519.21 (075.8)

Реєстр. № НП 25/26-109. Обсяг 4,0 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

ЗМІСТ

Вступ	8
1. Надійність технічних об'єктів і систем. Основні поняття	10
1.1. Поняття надійності енергетичного обладнання	10
1.2. Фізична сутність надійності	11
1.3. Показники надійності	13
Контрольні запитання	20
2. Основи математичної статистики в теорії надійності	21
2.1. Основні поняття	21
2.2. Оцінювання найімовірніших причин втрати працездатності технічними об'єктами	24
2.3. Поняття про відновлювальні і невідновлювальні об'єкти	25
2.4. Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів	26
Контрольні запитання	32
3. Показники безвідмовності відновлюваних об'єктів	34
3.1. Параметр потоку відмов	34
3.2. Показники ремонтпридатності	35
3.3. Показники збережуваності	36
3.4. Показники довговічності	37
3.5. Комплексні показники надійності	38
3.6. Відмови технічних об'єктів. Характеристика відмов	41
3.7. Моделі відмов	45
3.8. Суто ймовірнісні моделі відмов	46
Контрольні запитання	52
4. Надійність технічних систем	53
4.1. Поняття технічної системи	53
4.2. Резервування систем	54
4.3. Структурне резервування	55

4.4. Кратність резервування	57
4.5. Математичне оцінювання надійності систем	58
4.6. Способи зменшення інтенсивності відмов	63
4.7. Вплив резервування на надійність	66
Контрольні запитання	68
5. Випробування на надійність	69
5.1. Види випробувань	69
5.2. Випробування невідновлюваних виробів	71
5.3. Випробування відновлюваних виробів	72
5.4. Форсування випробувань	72
5.5. Періодичні контрольні випробування	75
5.6. Прогнозування і забезпечення надійності виробів	77
5.7. Період виробництва	82
5.8. Період експлуатації	83
Контрольні запитання	85
6. Структурний підхід до забезпечення надійності енергообладнання ...	86
6.1. Основні напрямки розвитку методів оцінки надійності	86
6.2. Модель формування відмов енергетичного обладнання	89
6.3. Підвищення надійності обладнання на стадії проектування	92
6.4. Роль технології машинобудування в забезпеченні надійності ...	95
6.5. Вплив експлуатаційних факторів на надійність енергетичного обладнання	97
Контрольні запитання	101
7. Відмови і пошкодження в роботі енергообладнання	102
7.1. Класифікація і ймовірність відмов енергообладнання	102
7.2. Резервування на електростанції	108
7.3. Резерв в енергосистемі	110
7.4. Резервування відпуску теплової енергії	111
Контрольні запитання	112

8. Забезпечення надійності енергообладнання	113
8.1. Надійність енергоблоків на різних режимах роботи	113
8.2. Шляхи забезпечення надійності енергообладнання	117
Контрольні запитання	125
9. Надійність оперативних ергатичних систем на електростанціях	126
9.1. Загальні відомості про ергатичні системи управління	126
9.2. Характеристика прийому, обробки та видачі інформації людиною оператором	128
9.3. Методи оцінки людино-машинної системи	130
9.4. Головні вимоги до інформаційно-функціональної моделі надійності оператора	134
9.5. Структурна модель надійності оператора	136
9.6. Інформаційний стрес та його вплив на рівень інформаційної надійності оператора	139
9.7. Комбінований метод визначення функціональної надійності оператора	142
Контрольні запитання	144
10. Оцінка впливу динамічного навантаження на надійність енергетичного обладнання	145
10.1. Загальні положення	145
10.2. Крутильні коливання	145
10.3. Поперечні коливання	153
10.4. Розрахунок коефіцієнту запасу міцності за складного динамічного навантаження	157
Контрольні запитання	158
11. Використання методів механіки руйнування для підвищення надійності енергетичного обладнання	159
11.1. Предмет механіки руйнування	159
11.2. Характеристики тріщиностійкості	160

11.3. Причини виникнення локального пошкодження типу тріщини у роторах турбін	163
11.4. Закономірності розвитку тріщини в елементах конструкцій ...	165
Контрольні запитання	173
12. Підвищення надійності енергетичного обладнання на основі вібраційної діагностики пошкоджень	174
12.1. Загальне поняття про вібродіагностику	174
12.2. Вібраційні складові та причини їхньої появи	176
12.3. Загальна ідея вібраційної діагностики	178
12.4. Власні частоти коливань	180
12.5. Характеристики демпфірування	184
12.6. Нелінійні ефекти	186
12.7. Нелінійні ефекти при основному резонансі	187
12.8. Нелінійні резонанси	189
12.9. Практичне використання нелінійної вібродіагностики	193
12.10. Датчики для вимірювання вібраційних параметрів	195
Контрольні запитання	197
13. Вплив тертя та зношування на надійність обладнання	198
13.1. Тертя і зношування. Основні поняття	198
13.2. Корозійні випробування металів як метод підвищення надійності	203
13.3. Фретинг-корозія і її вплив на надійність енергообладнання	205
13.4. Кавітаційне зношування	207
13.5. Інші види зношування	208
13.6. Змащування машин і механізмів	213
13.7. Шляхи підвищення працездатності енергетичного обладнання	217
Контрольні запитання	220
14. Надійність енергетичного обладнання як основний чинник якості, ефективності і економічності	221

14.1. Якість і надійність технічних систем	221
14.2. Надійність об'єктів і систем та їхня ефективність	225
14.3. Економічні показники надійності	228
14.4. Основні напрямки підвищення рівня якості енергетичного обладнання	230
14.5. Статистичні методи оцінки якості	230
Контрольні запитання	233
Перелік посилань	235
Список рекомендованої літератури	236
Предметний покажчик	237

ВСТУП

Тривалий досвід експлуатації енергетичного обладнання електростанцій України свідчить про можливість суттєвих його пошкоджень різної природи (механічна і термічна втома, старіння, повзучість, корозія тощо) в результаті статичного і динамічного навантаження відповідальних конструктивних елементів, дії змінної у часі високої температури, корозійного середовища. В ряді випадків такі пошкодження досягають критичних розмірів, що призводить до катастрофічних руйнувань енергетичного обладнання.

Одним із шляхів попередження аварійних подій, пов'язаних з тривалою експлуатацією енергетичного обладнання, є оцінка його надійності на основі дослідження впливу технологічних, конструктивних і експлуатаційних факторів на пошкодження елементів конструкцій [1].

Загальне розуміння надійності енергетичного обладнання полягає у виконанні ним протягом заданого наперед часу визначених функцій з відповідною якістю. В енергетиці забезпечення надійності є переважно технічною задачею, яка вирішується на етапі створення конструкції, розробки технології виготовлення і, нарешті, на етапі експлуатації обладнання. Разом з тим значну роль у забезпеченні надійності обладнання грають економічні фактори, оскільки забезпечення високої надійності може потребувати значних капіталовкладень, що зробить експлуатацію такого обладнання економічно не вигідним.

Теорія надійності спирається на такі розділи математичного аналізу, як теорія ймовірності і статистичний аналіз. Для кількісної оцінки надійності тих чи інших видів енергетичного обладнання використовують декілька десятків показників, кожен з яких має свої особливості і межі застосування [2]. Використовувані в енергетиці показники надійності визначаються на основі дослідів (спостережень) і статистичного аналізу. Як правило під дослідом в енергетиці розуміють проведення діагностики енергетичного

обладнання. Тому кредитний модуль «Надійність енергетичного обладнання» є логічно дотичним до дисциплін «Діагностика теплоенергетичного устаткування» і «Експлуатація енергетичного обладнання».

Навчальний посібник «Надійність енергетичного обладнання» буде корисним при підготовці здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій» спеціальності G4 «Енерговиробництво».

1. НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ.

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

1.1. Поняття надійності енергетичного обладнання

Підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання неможливе без оцінювання надійності його роботи. Недостатня надійність енергетичного обладнання призводить до збільшення частки експлуатаційних витрат порівняно з загальними витратами на проектування, виробництво і експлуатацію. При цьому вартість експлуатації енергетичного обладнання може в багато разів перевищити вартість його розробки і виготовлення. Крім того, відмови енергетичного обладнання призводять до різного роду важких наслідків, в тому числі аварій і катастроф з людськими жертвами і значними економічними втратами. Таким чином надійність є одним з найважливіших техніко-економічних показників енергетичного обладнання.

Надійність – це властивість технічного засобу виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах, що відповідають заданим режимам та умовам використання, технічного обслуговування, збереження і транспортування.

Проблема забезпечення надійності пов'язана з усіма етапами створення виробів та усім періодом їх практичного використання. Надійність засобу закладається в процесі його конструювання і розрахунку та забезпечується в процесі його виготовлення шляхом правильного вибору технології виготовлення, контролю якості початкових матеріалів, контролю режимів і умов виготовлення. Надійність забезпечується шляхом правильного зберігання і підтримується правильною експлуатацією технічного засобу, профілактичним контролем і ремонтом.

Основними чинниками, які впливають на надійність технічних об'єктів, є конструктивні, виробничо-технологічні та експлуатаційно-технічні.

Конструктивні чинники полягають у структурній побудові системи; конструктивному виконанні окремих елементів і системи в цілому; ступені відповідності конструктивних і схемних рішень реальним умовам функціонування; ступені пристосованості складових об'єкта до відновлення працездатності після відмови.

Виробничо-технологічні чинники передбачають реалізацію прогресивних технологічних процесів; використання сучасного обладнання; виконання вимог технічної документації; забезпечення стабільності якості виробів.

Експлуатаційно-технічні чинники визначаються умовами роботи обладнання, сукупності ремонтно-профілактичних заходів, станом комплектуючих елементів.

1.2. Фізична сутність надійності

Більшість конструктивних елементів енергетичного обладнання, що зазнають тих чи інших видів пошкодження, підлягають відновленню. Час відновлення та роботи об'єкта між відмовами є випадковою величиною. З огляду на це математичним апаратом теорії надійності є теорія ймовірностей і математична статистика.

Методи теорії ймовірностей дають можливість досліджувати закономірності відмов як випадкових явищ, ґрунтуючись на визначенні надійності цілого класу однотипних об'єктів. Спостерігаючи за закономірністю відмов під час тривалої експлуатації певного об'єкта, можна дійти висновку про його надійність.

Відмові завжди передують внутрішні зміни в системі. Вони можуть проявлятися по-різному, залежно від типу об'єкта, місця та характеру відмови. В одній технічній системі зростає спожита потужність, збільшуються внутрішні витрати, зменшується коефіцієнт корисної дії тощо, а в іншій – спостерігається дестабілізація характеристик, з'являються непередбачувані зміни вихідних параметрів. Спостерігаючи за цими змінами, можна в кожний момент часу

визначити запас надійності системи, передбачити появу відмови, своєчасно її ліквідувати або не допустити. Необхідним елементом визначення змін досліджуваної системи є технічна діагностика.

Технічна діагностика – наука, що досліджує технічні стани та форми їх виявлення в об'єктах, розробляє методи оцінювання технічних станів, принципи побудови і застосування систем діагностування.

Кінцевою метою діагностування є зниження витрат на технічне обслуговування і ремонт обладнання, забезпечення встановленого рівня безвідмовності й максимальної продуктивності об'єктів у процесі експлуатації. Отже, технічне діагностування є засобом підвищення надійності технічних об'єктів.

Сукупність відмов елементів, що зумовлюють функціональну відмову об'єкта, визначають з аналізу їхнього цільового призначення (наприклад, порушення фарбування зовнішньої поверхні трубопроводу не є його відмовою як пристрою для транспортування), конструктивних особливостей, а також статистичних даних про результати експлуатації. Тісний зв'язок показників надійності з безпекою технологічного процесу й ефективністю використання машин, обладнання та інших технічних засобів свідчить про важливість нормування вимог до надійності та її забезпечення в процесі експлуатації.

Практика свідчить, що не тільки серйозні відмови функціональних систем, а й незначні збої в роботі технічних об'єктів можуть призвести до тяжких наслідків. Аварійні ситуації виникають також унаслідок помилок оператора. Зважаючи на це, особливу увагу приділяють розробленню логічних схем для оцінювання можливих аварійних ситуацій і відповідних дій оператора.

В основі будь-якої відмови лежать певні фізико-хімічні і інформаційні процеси, серед яких зародження і розвиток дефектів матеріалів; фізико-хімічні процеси старіння; механічні і термічні навантаження; конструктивно-технологічні дефекти; експлуатаційний режим тощо. Оцінювання надійності

різних об'єктів потребує дослідження впливу цих і багатьох інших факторів на стан об'єктів і властивості матеріалів.

1.3. Показники надійності

Практика експлуатації енергетичного обладнання теплових та атомних електростанцій створила передумови для формування й розвитку наукової дисципліни „Надійність енергетичного обладнання теплових та атомних електростанцій”. Це наука про методи забезпечення надійності й довговічності технічних об'єктів і технологічних ліній (систем) при проектуванні, виготовленні та збереженні їх у період експлуатації.

Існує певна послідовність оцінки надійності енергетичних об'єктів:

- установлення кількісних показників надійності;
- розробка методів аналітичного оцінювання надійності;
- розробка методів оцінювання надійності за результатами випробувань;
- забезпечення й оптимізація показників надійності на стадіях розробки, виготовлення та експлуатації технічних об'єктів.

Для нормативного забезпечення методів, заходів та засобів вимірювання, спрямованих на досягнення необхідного рівня надійності, використовується система стандартів «Надійність у техніці». Базовим в ній є стандарт ДСТУ 2860-94 «Надійність у техніці. Терміни та визначення» [3]. Ця система стандартів забезпечує ефективність організаційно-технічних, конструкторсько-технологічних і експлуатаційних заходів, спрямованих на досягнення необхідного рівня надійності технічних засобів.

Поняття «надійний» або «ненадійний» характеризує властивість технічного об'єкта якісно. Для кількісної оцінки його надійності, яка дає можливість порівняльного аналізу, вищезгаданий стандарт визначає п'ять властивостей об'єкта: довговічність, безвідмовність, ремонтпридатність, збережуваність, готовність.

Довговічність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції до переходу в граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування (ТО) та ремонту.

Довговічність є одним з ключових показників надійності в енергетиці. Як впливає з наведеного визначення довговічність оцінюється відносно так званого граничного стану об'єкта, сутність якого буде розкрито далі.

Безвідмовність – властивість об'єкта виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Ремонтопридатність – властивість об'єкта бути пристосованим до підтримання та відновлення стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою ТО та ремонту.

Характеризувати ремонтпридатність можна часом вимушеного простою машин чи обладнання, який дорівнює сумарному часу, потрібному для профілактики, пошуку причини відмови та її усунення. Чим надійнішою є технічна система, чим вища її ремонтпридатність, тим менше вона відмовляє і простоє, тобто тим вища ймовірність для системи в будь-який момент часу перебувати у працездатному стані.

Ремонтопридатність визначає ефективність будь-якого технічного об'єкта чи технічної системи. Якщо система достатньо надійна і рідко відмовляє, але має низьку ремонтпридатність, потребує великих витрат часу на профілактику та відновлення, то вона не завжди може конкурувати з менш надійною системою, в якій час простою, потрібний для профілактики та відновлення, є порівняно невеликим. Для виконання поставленого завдання першій системі може бути потрібно більшого резерву часу, ніж другій. Крім того, ремонтпридатність визначає вартість експлуатації, необхідну кількість резервних вузлів, обсяг ремонтних засобів тощо.

Поняття ремонтпридатності стосується об'єктів і систем тривалого використання та виробів з тривалим терміном зберігання. Це поняття не

застосовується для об'єктів і систем разового використання, які не відновлюються ні протягом зберігання, ні в період експлуатації.

Збережуваність – властивість об'єкта зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати необхідні функції під час і після зберігання та транспортування.

Готовність – властивість об'єкта бути здатним виконувати потрібні функції в заданих умовах у будь-який час чи протягом заданого інтервалу часу за умови забезпечення необхідними зовнішніми ресурсами. Ця властивість залежить від поєднання властивостей безвідмовності, ремонтпридатності, а також від матеріально-технічного забезпечення його ТО і ремонту.

Кожен з цих п'яти показників надійності об'єкта оцінюють за декількома параметрами.

Параметри, за якими оцінюють безвідмовність об'єкта:

- імовірність безвідмовної роботи;
- середній наробіток до відмови;
- інтенсивність відмов;
- гамма-відсотковий наробіток на відмову;
- наробіток на відмову;
- параметр потоку відмов.

Імовірність безвідмовної роботи об'єкта (його вузлів і агрегатів) – це імовірність того, що протягом заданого наробітку відмова об'єкта не виникне. Середній наробіток до відмови – це математичне сподівання наробітку об'єкта до першої відмови. Інтенсивність відмов – умовна густина імовірності виникнення відмови об'єкта, яка визначається за умови, що до цього моменту відмова не виникла. Гамма-відсотковий наробіток на відмову – це наробіток, протягом якого відмова об'єкта не виникне з імовірністю γ , вираженою у відсотках. Наробіток на відмову – це відношення наробітку ремонтпридатного об'єкта до математичного сподівання числа його відмов протягом цього наробітку.

Довговічність об'єкта оцінюють за наступними параметрами:

- середній ресурс;
- середній термін служби;
- гамма-відсотковий ресурс;
- гамма-відсотковий термін служби;
- призначений ресурс;
- призначений термін служби.

Середній ресурс – це математичне сподівання ресурсу (від початку експлуатації або від моменту капітального ремонту об'єкта до настання його граничного стану). Середній термін служби – це математичне сподівання терміну служби (календарної тривалості від початку експлуатації нового або відремонтованого об'єкта до настання його граничного стану). Гамма-відсотковий ресурс – це сумарний наробіток, протягом якого об'єкт не досягне граничного стану із імовірністю γ , вираженою у відсотках. Гамма-відсотковий термін служби – це календарна тривалість експлуатації, протягом якої об'єкт не досягне граничного стану із імовірністю γ , вираженою у відсотках. Призначений ресурс – це сумарний наробіток, при досягненні якого експлуатацію об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану. Призначений термін служби – це календарна тривалість експлуатації, при досягненні якої експлуатацію об'єкта належить припинити незалежно від його технічного стану.

Ремонтпридатність об'єкта оцінюють за наступними параметрами:

- імовірність відновлення;
- середня тривалість відновлення;
- гаммавідсоткова тривалість відновлення;
- інтенсивність відновлення;
- середня інтенсивність відновлення;
- середня трудомісткість ТО (ремонту).

Імовірність відновлення – це імовірність того, що час відновлення працездатного стану об'єкта не перевищить заданого значення (“відновлення”

означає, що після виявлення несправності об'єкта він знову відновлює здатність виконувати потрібну функцію). Середня тривалість відновлення – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану об'єкта після відмови. Гамма-відсоткова тривалість відновлення – це інтервал часу, протягом відновлення працездатності об'єкта здійснюється з імовірністю γ , вираженою у відсотках. Інтенсивність відновлення – це умовна густина імовірності відновлення працездатності об'єкта, визначена для одного моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не завершилося. Середня інтенсивність відновлення – це її середнє значення в заданому інтервалі часу. Середня трудомісткість ТО (ремонт) – це математичне сподівання трудомісткості ТО (ремонт), виражене у людино-годинах.

Збережуваність об'єкта оцінюють за наступними параметрами:

- середній термін збережуваності;
- гамма-відсотковий термін збережуваності.

Середній термін збережуваності – це математичне сподівання строку збережуваності. Гамма-відсотковий термін збережуваності – це термін збережуваності, якого досягає об'єкт із заданою імовірністю γ , вираженою у відсотках.

Готовність оцінюють за наступними параметрами:

- коефіцієнт готовності;
- коефіцієнт неготовності;
- середній коефіцієнт готовності;
- стаціонарний коефіцієнт готовності;
- коефіцієнт оперативної готовності;
- коефіцієнт технічного використання;
- коефіцієнт збереження ефективності.

Коефіцієнт готовності – імовірність того, що об'єкт виявиться працездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об'єкта за призначенням не передбачене. Коефіцієнт неготовності

(коефіцієнт простою) – імовірність того, що об’єкт виявиться непрацездатним у довільний момент часу, крім запланованих періодів, протягом яких використання об’єкта за призначенням не передбачене. Середній коефіцієнт готовності – середнє значення нестационарного коефіцієнта готовності у заданому інтервалі часу. Стационарний коефіцієнт готовності – значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об’єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими. Коефіцієнт оперативної готовності – імовірність того, що за винятком тих запланованих періодів, протягом яких використання об’єкта за призначенням не передбачено, він у довільний момент часу виявиться у працездатному стані і надалі виконуватиме потрібну функцію протягом заданого інтервалу часу. Коефіцієнт технічного використання – це відношення математичного сподівання сумарного часу перебування об’єкта у працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного сподівання сумарного часу перебування об’єкта в працездатному стані та у простоях, зумовлених ТО і ремонтом за той самий період. Коефіцієнт збереження ефективності – це відношення значення показника ефективності використання об’єкта за призначенням за певну тривалість експлуатації до номінального значення цього показника, розрахованого за умови, що відмови цього об’єкта протягом того ж періоду не виникають.

Кожен із цих показників, які характеризують ту чи іншу властивість об’єкта щодо його надійності, розраховують за результатами попередньо проведених експериментальних досліджень чи спостережень з використанням відповідного математичного апарату.

Визначення надійності енергетичного обладнання ґрунтується також на поняттях його працездатності і відмови.

Працездатність – стан об’єкта, який характеризується його здатністю виконувати всі потрібні функції, обумовлені технічною документацією, до настання відмови.

Технічна документація передбачає певну послідовність дій, методи технічного обслуговування і ремонту об'єктів, норми та допустимі відхилення від установлених параметрів. Наприклад, для парової турбіни це коефіцієнт корисної дії, затрати часу на ремонт, експлуатаційні параметри та інші показники працездатності.

Відмова – це стан машини, приладу чи апарата, який полягає в порушенні їхньої працездатності в цілому або окремого елемента.

Ознаки (критерії) відмов рекомендується обумовлювати в технічній документації на вироби заданого типу. Час виникнення відмови і час роботи об'єкта між відмовами є випадковими величинами. Це пояснюється випадковими змінами умов експлуатації об'єкта, відмінністю в кваліфікації обслуговуючого персоналу, особливостями технологічного процесу (різними показниками якості матеріалів, налагодженням апаратури і систем, стомленістю обслуговуючого персоналу тощо), умовами транспортування палива і готової продукції тощо.

Необхідність підналагоджування машини, яка регламентована умовами експлуатації й обслуговування і пов'язана з недостатньою якістю самої машини, не вважається відмовою. Наприклад, регулювання окремих механізмів та інші профілактичні роботи внесені до нормативів технологічного і міжремонтного обслуговування. Чим вищий ступінь досконалості машини, тим менше таких “узаконених” відмов, тим краще машина пристосована до безперервної безвідмовної роботи.

Розрізняють шість основних станів об'єкта. Справний стан (справність) – стан об'єкта, за яким він здатний виконувати усі задані функції. Несправний стан (несправність) – стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоча б одну із покладених на нього функцій. Працездатний стан (працездатність) – стан об'єкта, який характеризується його здатністю виконувати усі потрібні функції. Непрацездатний стан (непрацездатність) – стан об'єкта, за яким він нездатний виконувати хоча б одну з потрібних функцій. Критичний стан – стан об'єкта, що

може призвести до травмування людей, значних матеріальних збитків чи інших небажаних наслідків. Критичний стан об'єкта може характеризуватися несправностями вузлів і агрегатів об'єкта, які впливають на безпеку його експлуатації. Граничний стан – стан об'єкта, за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне. Досягнення граничного стану конструкції чи матеріалу означає можливість катастрофічного руйнування об'єкта з тяжкими наслідками.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під надійністю енергетичного обладнання?
2. Які основні чинники впливають на надійність енергетичного обладнання?
3. З якою метою використовується технічна діагностика?
4. Які основні показники надійності використовують в енергетиці?
5. Що таке відмова і інтенсивність відновлення?
6. Що характеризує коефіцієнт готовності?

2. МАТЕМАТИЧНА СТАТИСТИКА В ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ

2.1. Основні поняття

Визначення показників надійності енергетичного обладнання і машин за допомогою математичних методів на основі узагальнення статистичної інформації, накопиченої за час експлуатації, дає змогу встановлювати ймовірнісні закономірності та співвідношення між випадковими чинниками, які впливають на рівень надійності об'єктів. При цьому застосовують апарат теорії ймовірностей і математичної статистики.

Практичним підґрунтям для використання математичної статистики є досвід, спостереження, активний експеримент.

У математичній статистиці використовують наступні поняття: випробування (дослід), подія, випадкова величина, ймовірність, частота, частість.

Випробування (дослід) – це практичне здійснення деяких умов чи правил для визначення певних властивостей об'єкта.

Подія – це явище, яке виникає у результаті дослідів.

Події бувають поодинокими, коли явище виникло один раз при багаторазовому повторенні дослідів і більше не виникає. Переважно ж події бувають масовими, тобто такими, які повторюються за багаторазового проведення дослідів. У практиці експлуатації енергетичного обладнання мають місце масові події.

Експлуатація об'єктів енергетики з позицій теорії ймовірностей – це випробування (дослід), а виникнення відмов за певний період часу чи наробітку – це події.

Події бувають вірогідні, неможливі, випадкові, сумісні, несумісні, рівноможливі, незалежні.

Вірогідні події в досліді виникають завжди (наприклад, деградація властивостей матеріалу з часом, зміна розмірів деталей унаслідок їх спрацювання, пошкодження тощо).

Неможливі події в дослідах ніколи не виникають (наприклад, наявність незношеного валу турбіни, який надійшов у ремонт чи вичерпав свій ресурс).

Випадкові події в результаті досліду можуть виникати або не виникати (наприклад, відмова якогось конструктивного елемента об'єкта на заданому проміжку часу або наробітку).

Сумісні події – дві випадкові події, одна з яких не виключає можливості появи іншої (наприклад, відмова контрольних приладів турбіни, як подія А, не виключає відмови турбіни, як події В).

Несумісні події – такі дві події, коли при випробуваннях поява однієї унеможлиблює появу іншої (наприклад, відмова турбіни і її працездатний стан – це події, які не можуть виникати одночасно).

Рівноможливі події – декілька можливих подій, які з'являються у процесі випробування (наприклад, відмова паропроводу, вимірювальних приладів, турбогенератора). До них належать також сумісні події.

Незалежні події – такі, поява яких не залежить від того, яка подія виникла перед цим (наприклад, попередня відмова системи контролю не впливає на наступну відмову системи забезпечення пари).

Факти виникнення подій (відмов) є якісною характеристикою результатів випробувань. Кількісну характеристику становлять випадкові величини та їхні значення.

Випадковою величиною називають таку, яка у результаті досліду може набувати певного значення, наперед (перед дослідом) невідомого.

Наприклад, наробіток об'єкта до відмови, середній ресурс, спрацювання деталі тощо. Випадкові величини позначають великими латинськими літерами (X, Y та ін.), а їхні можливі кількісні значення відповідними малими (x, y тощо).

Випадкові величини можуть бути дискретними та безперервними.

Дискретна випадкова величина – це величина, множина значень якої є зліченою (наприклад, кількість дефектних деталей турбіни, рівень спрацювання, кількість відмов тощо).

Безперервна випадкова величина – така, яка на певному інтервалі часу має неперервні значення (наприклад, тривалість безвідмовної роботи об'єкта, його ТО чи ремонту тощо).

З метою кількісної оцінки виникнення випадкових подій під час реалізації різних дослідів користуються поняттям **ймовірність події**, числове значення якого буде тим більшим, чим вища можливість появи подій

$$P(A) = m/n ,$$

де $P(A)$ – імовірність появи події A ; m – кількість випадків у досліді, які призводять до появи події A ; n – загальна кількість дослідів.

Експериментальне значення ймовірності появи події називають **експериментальною (емпіричною) частістю**, або **відносною частотою події**, W_i і визначають за формулою

$$W_i = m_i/n_i ,$$

де m_i – частота появи випадкової події (наприклад, відмови); n_i – загальна кількість проведених дослідів для визначення емпіричної частоти.

Ймовірності випадкових величин або подій можна додавати і множити. Для цього користуються відповідними формулами додавання і множення ймовірностей.

Формула додавання ймовірностей кількох незалежних і несумісних подій A_i має вигляд:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) ,$$

тобто, ймовірність появи однієї з кількох незалежних і несумісних подій дорівнює сумі ймовірностей цих подій.

Для повної групи таких подій A_i виконується умова:

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = 1 .$$

На практиці у дослідженнях надійності обладнання, машин та їхніх систем розглядають, як правило, дві несумісні протилежні події – працездатний стан з імовірністю P і стан їхніх відмов з імовірністю Q . Тоді

$$P + Q = 1, \quad Q = 1 - P .$$

Якщо дві події A і B є незалежними, то ймовірність сумісної появи їх дорівнює добутковій ймовірності цих подій. Формула множення ймовірностей має вигляд:

$$P(AB) = P(A)P(B).$$

Якщо $P(A) = P(B)$, то $P(AB) = P^2(A)$.

У випадку великої кількості незалежних подій маємо

$$P(A_1, A_2, \dots, A_n) = P(A_1)P(A_2), \dots, P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i).$$

При цьому, якщо

$$P(A_1) = P(A_2) = \dots = P(A_n),$$

то

$$\prod_{i=1}^n P(A_i) = P^n(A_i).$$

Для залежних випадкових подій формула множення ймовірностей набуває такого вигляду:

$$P(AB) = P_B(A)P_A(B),$$

де $P(AB)$ – ймовірність одночасної появи подій A і B ; $P_B(A)$ – ймовірність появи події A за умови, що вже виникла подія B (цю ймовірність ще називають умовною), $P_A(B)$ – ймовірність появи події B за умови, що вже виникла подія A .

2.2. Оцінювання найімовірніших причин втрати працездатності технічними об'єктами

З використанням формул множення і додавання ймовірностей та з урахуванням залежності та незалежності настання подій розроблено математичний апарат (формулу Байєса), який застосовують для визначення найімовірніших причин подій, які складають повну групу.

Формула Байєса дозволяє визначити ймовірність події за умови, що сталася інша статистично взаємозалежна з нею подія.

Наприклад, припустімо, що нас цікавить технічний стан турбіни (пошкодження), і ми знаємо термін служби турбіни. Якщо технічний стан пов'язаний з терміном служби, то, застосовуючи теорему Байєса, інформацію про

термін служби можливо використати для точнішої оцінки ймовірності того, що турбіна має пошкодження.

Теорема Байєса задається математично таким рівнянням

$$P_B(A) = \frac{P_A(B)P(A)}{P(B)},$$

де $P(A)$ і $P(B)$ є ймовірностями подій A і B безвідносно одна до одної; $P_B(A)$ – ймовірність події A за умови істинності події B ; $P_A(B)$ – ймовірність події B за умови істинності події A .

У більш складних випадках формула Байєса має більш складний вигляд. Нехай подія A_j з ознаками j може наступати лише за умови появи однієї з кількох подій (гіпотез) $B_1(H_1), B_2(H_2), \dots, B_i(H_i), \dots, B_n(H_n)$, які утворюють повну групу подій. Події A_j та стан H_i є такими, що $P(A_j) > 0$ та $P(H_i) > 0$.

Якщо подія A_j вже відбулася, то ймовірності подій $B_i(H_i)$ можна оцінити за узагальненою формулою Байєса:

$$P_{AJ}(H_i) = \frac{P(H_i) \prod_j^m P_{Hi}(A_j)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) \prod_j^m P_{Hi}(A_j)},$$

де $P_{AJ}(H_i)$ – ймовірність стану H_i , який визначається комплексом ознак A_j ; $P(H_i)$ – ймовірність стану H_i ; $P_{Hi}(A_j)$ – ймовірність існування ознаки A_j у стані H_i .

У статистичних дослідженнях події називають гіпотезами H_i , а $p(H_i)$ апріорною (apriori – до дослідження) ймовірністю гіпотези H_i . Умовна ймовірність $P_{Hi}(A_j)$ трактується як апостеріорна (aposteriori – після дослідження) ймовірність гіпотези H_i після того, як настане подія A_j .

2.3. Поняття про відновлювальні і невідновлювальні об'єкти

Показниками надійності називають кількісні характеристики однієї чи кількох властивостей, що характеризують надійність технічних об'єктів. Для виробів різного призначення та конструкцій застосовують різні показники надійності.

Всі об'єкти при розрахунках надійності можна поділити на групи, що відрізняються за показниками надійності та методами її оцінювання:

1) невідновлювальні об'єкти (не підлягають ремонту), використовуються до першої відмови;

2) відновлювані (ремонтоздатні) об'єкти.

У свою чергу відновлювані об'єкти розрізняють за особливостями процесу відновлення (рис. 2.1).

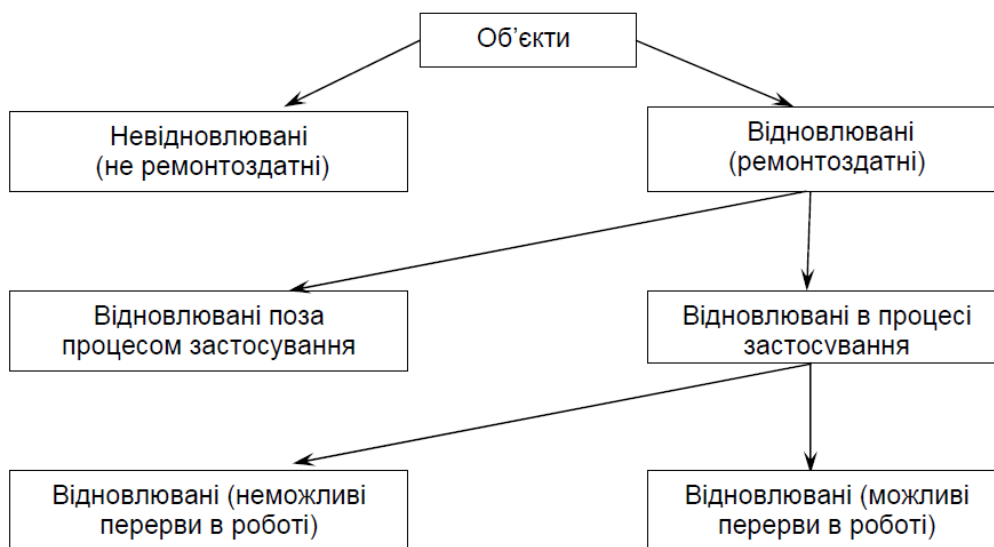


Рис. 2.1. Класифікація об'єктів при розрахунках надійності.

Для невідновлюваних систем зазвичай обмежуються показниками безвідмовності. Показники безвідмовності часто використовують і для об'єктів, що підлягають відновленню після відмов, але саме до моменту першої відмови. Головним чином це стосується об'єктів, відмови яких відбуваються надзвичайно рідко та призводять до важких наслідків.

2.4. Показники безвідмовності невідновлюваних об'єктів

Події, які можуть виникнути під час роботи (або випробування) машин чи систем, відбуваються внаслідок сумісної дії багатьох причин, що можуть виявлятися у випадковому поєднанні. Для великої кількості діючих об'єктів ці події набувають певного характеру розподілу у часі, що підлягає законам розподілу випадкових величин. Теорія надійності ґрунтується на законах

математичної статистики, а надійність і всі її показники розглядають у ймовірнісному аспекті.

Якщо спостерігати за роботою N об'єктів упродовж певного періоду часу t , то після завершення цього терміну виявиться, що n_d об'єктів, для яких вибрана подія (наприклад, відмова) не відбулася, а для n_e об'єктів ця подія відбулася. Тобто після завершення періоду t маємо n_d дієздатних об'єктів і n_e об'єктів, що відмовили. Тоді відносна кількість відмов визначається формулою

$$F(t) = \frac{n_e}{N} \approx Q(t).$$

Якщо спостереження проводять для прогнозування надійності, то величину $F(t)$ можна розглядати як кількісну оцінку ймовірності відмови або, якщо N нескінченно велике – як імовірність відмови $Q(t)$. При цьому ймовірність безвідмовної роботи має вигляд

$$P(t) = \frac{n_d}{N} = 1 - \frac{n_e}{N} = 1 - F(t).$$

Оскільки відмова та безвідмовність роботи є несумісними подіями, то

$$P(t) + F(t) = 1.$$

Із наведених залежностей випливає, що

$$\text{при } t = 0 \rightarrow n_e = 0, P(t) = 1, F(t) = 0;$$

$$\text{при } t = \infty \rightarrow n_e = N, P(t) = 0, F(t) = 1.$$

Таким чином, неспадна функція $F(t)$ зі збільшенням аргументу зростає від 0 до 1 (монотонно для безперервних процесів і ступінчасто для дискретних). Цю функцію називають інтегральною (рис. 2.2) і в загальному вигляді позначають $F(x)$.

Похідну від функції розподілу по поточній змінній називають **щільністю розподілу випадкової величини**:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}.$$

У дискретному вигляді її записують наступним чином:

$$f(t) = \frac{\Delta n_e}{N\Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t}.$$

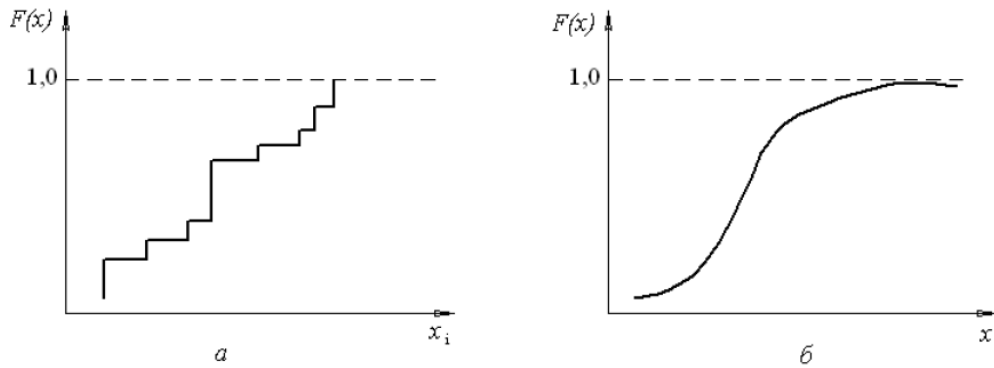


Рис. 2.2. Інтегральні емпіричні функції розподілу випадкових величин: (а) – дискретної; (б) – безперервної.

Функцію $f(t)$ можна побудувати за результатами випробувань. За обмеженої кількості випробувань з відомим результатом відношення кількості об'єктів n_{vi} , що відмовили, до загальної кількості об'єктів, випробуваних за цей самий час у цих же умовах, у математичній статистиці називають **частістю настання відмови**:

$$W = n_{vi} / N \Delta t .$$

Наприклад, при випробовуваннях на втому деякої кількості зразків N руйнування для кожного зразка настає за різної кількості циклів навантаження. Розташування визначених випадкових значень напрацювань у зростаючому порядку створює упорядкований, або **варіаційний ряд**. Варіаційний ряд випадкових величин подають графічно (рис. 2.3).

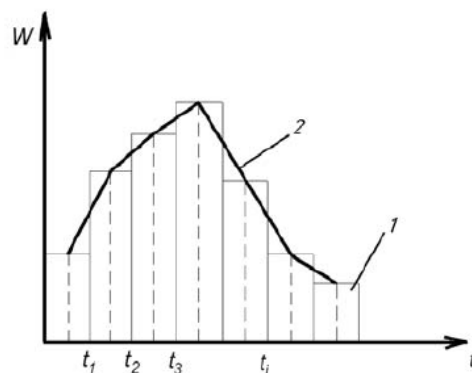


Рис. 2.3. Розподіл відмов у часі: 1 – гістограма, 2 – полігон.

Увесь часовий інтервал поділяють на рівні відрізки з кроком $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ та визначають кількість зруйнованих зразків, які потрапили у кожний інтервал. По осі ординат відкладають кількість зразків, які відмовили в інтервалі часу Δt_i :

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^n n_{bi} / N \Delta t .$$

За нескінченно великої кількості випробовувань ступінчастий графік гістограми наближається до монотонного графіка (функції) і називається **щільністю розподілу імовірності настання події**, або щільністю розподілу випадкової величини $f(t)$. Форма диференціальної функції – це характерний закон розподілу випадкової величини (рис. 2.4).

Функція $f(x)$ характеризується математичним сподіванням, модою, квантилем, дисперсією (середнім квадратичним відхиленням) і коефіцієнтом варіації.

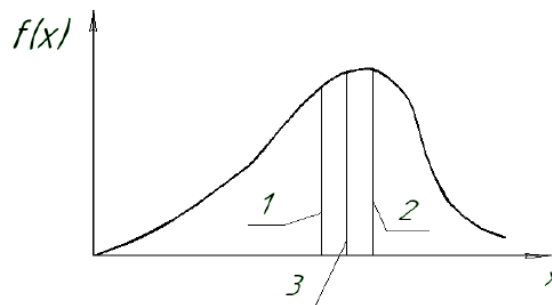


Рис. 2.4. Щільність ймовірності та характеристики групування випадкової величини: 1 – медіана; 2 – мода; 3 – математичне сподівання.

Математичне сподівання (середнє значення) m_x – основна характеристика випадкової величини X . Значення математичного сподівання, що визначається за результатами спостережень, для дискретних і безперервних величин називають оцінкою математичного сподівання, або оцінкою середнього значення:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{N}, \text{ або } \bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{g_i x_i}{N},$$

де x_i – поточне значення випадкової величини; g_i – кількість однакових значень x_i ; N – загальна кількість спостережень.

За досить великої кількості спостережень вважають, що $m_x = \bar{X}$. В імовірнісних задачах математичне сподівання визначають залежно від щільності розподілу $f(x)$ (для безперервних величин) або ймовірності p_i появи значення x_i (для дискретних величин):

$$m_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \quad m_x = \sum_{i=1}^n p_i x_i.$$

Мода – значення випадкової величини, що трапляється найчастіше, або найбільш імовірно її значення.

Квантиль – значення випадкової величини, що відповідає заданій імовірності. Квантиль, що відповідає імовірності 0,5, називають **медіаною**. Медіана є центром групування випадкової величини. Площу під графіком медіана поділяє навпіл.

Для нормального закону розподілу випадкових величин, який описує відома крива Гаусса, подана нижче, математичне сподівання, мода і медіана збігаються.

Дисперсія випадкової величини – це математичне сподівання квадрату відхилення цієї величини від її математичного сподівання. Оцінка дисперсії випадкової величини – середнє значення квадрата різниці між значеннями випадкової величини та її середнім значенням, а саме:

$$D_x = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2, \quad \text{або} \quad D_x = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N g_i (x_i - \bar{X})^2,$$

де N – загальна кількість спостережень; x_i – поточне значення випадкової величини; \bar{X} – середнє значення випадкової величини; g_i – кількість однакових значень випадкової величини.

Поняття “дисперсія” означає розсіювання і характеризує розкид випадкової величини. Для безперервних випадкових величин

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx.$$

Для дискретних випадкових величин

$$D_x = \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2 p_i,$$

де p_i – ймовірність появи значення x_i . Дисперсія вимірюється квадратом розмірності випадкової величини. Оскільки зручніше користуватися характеристикою розсіювання, що має розмірність випадкової величини,

введено характеристику *середнє квадратичне відхилення*, тобто квадратний корінь з дисперсії:

$$S_x = \sqrt{D_x}.$$

Для оцінювання розсіювання випадкових величин за допомогою безрозмірної (відносної) характеристики використовують *коефіцієнт варіації*, що дорівнює відношенню середнього квадратичного відхилення до математичного сподівання:

$$V_x = S_x/m_x.$$

Коефіцієнт варіації служить для оцінки характеристики розсіювання (мінливості) ознаки. Застосовується тоді, коли необхідно порівняти мінливість ознак об'єкта, які виражені в різних одиницях вимірювання. Мінливість вважається слабкою, якщо $V_x < 10\%$; середньою, якщо $V_x = 10-25\%$, і значною за умови $V_x > 25\%$.

Співвідношення показників надійності подано на рис. 2.5. Імовірність відмов і безвідмовної роботи через функцію щільності розподілу $f(t)$ пов'язані такими залежностями:

$$F(t) = Q(t) = \int_0^t f(t)dt ; \text{ при } t \rightarrow \infty \rightarrow F(t)=1;$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_0^\infty f(t)dt .$$

Функція $Q(t)$ є безперервною. Безперервну щільність розподілу наробітку до відмови називають частотою відмов. *Частота відмов* – це щільність розподілу часу безвідмовної роботи або похідна від імовірності відмови:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt} .$$

Властивістю функції $f(t)$ є те, що

$$\int_0^\infty f(t)dt = 1 .$$

Графік $f(t)$ називають *кривою розподілу наробітку до відмови*.

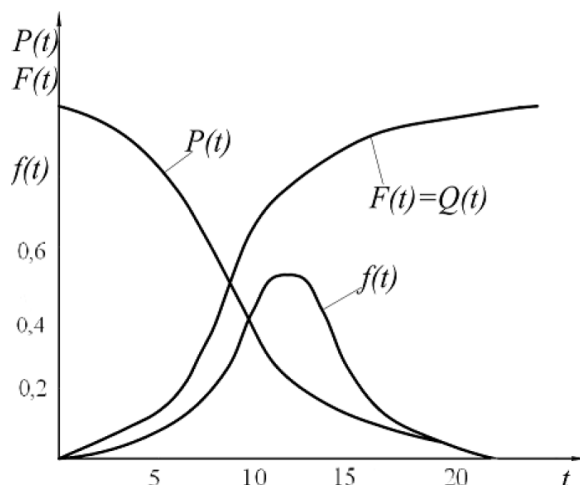


Рис. 2.5. Показники надійності колінчастого вала холодильного компресора: $P(t)$ – імовірність безвідмовної роботи; $Q(t)=F(t)$ – імовірність відмови; $f(t)$ – функція щільності розподілу випадкової величини.

Величина $f(t)dt$ характеризує ймовірність відмови на інтервалі наробітку ($t, t+dt$) об'єкта, взятого навмання з групи однакових. При цьому невідомо, чи працездатним був цей об'єкт на початку інтервалу (тобто в момент t) чи відмовив раніше. Це не завжди зручно. Тому $f(t)$ як самостійний показник надійності невідновлюваних об'єктів, застосовується обмежено.

Для невідновлюваних об'єктів частіше застосовують *інтенсивність відмов* $\lambda(t)$ – умовну щільність ймовірності виникнення відмов об'єкта, яка визначається для заданого наробітку за умови, що до цього наробітку відмова не виникла.

У статистичному трактуванні інтенсивність відмов є відношенням кількості об'єктів, які відмовили n_v за період часу Δt , до кількості об'єктів, що залишилися дієздатними n_d із загальної кількості випробуваних об'єктів:

$$\lambda(t) = n_v/n_d \Delta t .$$

Контрольні запитання

1. Що таке випадкова величина?
2. Як визначається ймовірність події?

3. Для чого використовують формулу Баєса стосовно технічних об'єктів?
4. Як відрізняються показники безвідмовності відновлюваних і невідновлюваних об'єктів?
5. Як визначається щільність розподілу випадкової величини?
6. Яким є взаємозв'язок між ймовірністю відмови і безвідмовної роботи?

3. ПОКАЗНИКИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1. Параметр потоку відмов

Як і наробіток до відмови невідновлюваних об'єктів, відмова відновлюваних об'єктів є подією випадковою. Для таких технічних об'єктів характерний так званий *потік відмов*, тобто відмови, що виникають одна за одною у випадковій відрізку часу.

Потік відмов можна характеризувати *головною функцією потоку відмов* $W(t)$, що є математичним сподіванням кількості відмов за період часу $(0, t)$:

$$W(t) = M(n(t)).$$

Очевидно, що $W(t)$ є невід'ємною неспадною функцією. Вона майже завжди диференційована. Існує величина

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W(t, t + \Delta t) - W(t)}{\Delta t} = dW(t)/dt.$$

яку називають *параметром потоку відмов* (частотою відмов). Вона є границею відношення ймовірності появи хоча б однієї відмови на інтервалі часу Δt до величини цього інтервалу за умови, що $\Delta t \rightarrow 0$.

Головною перевагою параметра потоку відмов як кількісної характеристики надійності є те, що вона дає змогу повністю оцінити властивості технічних об'єктів, які працюють у режимі заміни елементів. Після виникнення відмов такі технічні системи ремонтують (відновлюють), а потім експлуатують знову. Параметр потоку відмов можна також застосовувати для оцінювання надійності складних систем разового використання у процесі їх зберігання.

Відомості про значення $\omega(t)$ дають можливість правильно спланувати частоту профілактичних заходів, структуру ремонтних підрозділів, потрібну кількість і номенклатуру запасних елементів.

Середнє напрацювання до відмови m_{tp} – це відношення напрацювання відновлюваного об'єкта до математичного сподівання кількості його відмов

протягом часу напрацювання. Часто величину m_{tp} застосовують як самостійний показник надійності. Його статистична оцінка має вигляд

$$m_{tp} = Nt / \sum_{i=1}^N n_i(t) .$$

де $n_i(t)$ – кількість відмов i -го об'єкта протягом напрацювання t .

3.2. Показники ремонтпридатності

Важливою ознакою об'єкта є зручність його обслуговування. Вона є характеристикою технічного рівня конструкції, повинна плануватися на етапі проектування і мати кількісні показники. На практиці тривалість відновлення об'єкта майже завжди є значно меншою від наробітку між відмовами, але при розрахунках втрат унаслідок відмов і кількості обслуговуючого персоналу її потрібно враховувати.

Час відновлення працездатного стану технічної системи після відмови T_v є випадковою величиною. Вважатимемо, що розподіл величини T_v не залежить від часу, порядкового номера відновлення, тривалості попереднього відновлення, попереднього напрацювання між відмовами.

Ймовірність відновлення – це ймовірність того, що об'єкт після відмови буде відновлений протягом заданого часу t . Ця характеристика є функцією розподілу часу відновлення і має вигляд

$$S(t) = P\{T_v < t\} .$$

Очевидно, що

$$0 \leq S(t) \leq 1, \quad S(0) = 0, \quad S(\infty) = 1 .$$

Статистична оцінка для визначення ймовірності відновлення має вигляд

$$S(t) = N_v / N_{zv} ,$$

де N_{zv} – загальна кількість об'єктів, поставлених на відновлення; N_v – кількість об'єктів, час відновлення яких виявився меншим від заданого часу t .

Частота відновлення – це щільність розподілу часу відновлення. Отже,

$$f_v(t) = S'(t) .$$

Інтенсивність відновлення – це умовна щільність часу відновлення для моменту часу t і за умови, що до цього моменту відновлення об'єкта не відбувалося, тобто

$$\mu(t) = \frac{f_B(t)}{1-S(t)}.$$

Середнім часом відновлення є математичне сподівання часу відновлення

$$m_{t_B} = M[T_B] = \int_0^{\infty} t f_B(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - S(t)] dt .$$

Відповідно, для статистичної оцінки **середнього часу відновлення** матимемо

$$m_{t_B} = \sum_{i=1}^{N_{ЗВ}} t_{Bi} / N_{ЗВ} ,$$

де t_{Bi} – тривалість відновлення i -го об'єкта.

3.3. Показники збережуваності

Особливістю деяких технічних об'єктів є те, що в умовах зберігання переважають поступові відмови внаслідок погіршення характеристик елементів через їх старіння. При цьому навіть для однотипних елементів залежність параметрів технічного об'єкта від часу зберігання є випадковою функцією. Для передбачення збережуваності потрібно проводити випробування або екстраполяцію характеристик надійності елементів.

Існує великий клас технічних об'єктів і систем, час збереження яких співмірний з часом їх роботи, а іноді й перевищує його. Це об'єкти і системи разового використання (наприклад, системи керування військовими об'єктами) та системи з малим коефіцієнтом використання (наприклад, гальмівне парашутне обладнання для літаків та захисні подушки для автомобілів). Для автоматичних систем керування технологічними процесами така властивість, як збережуваність, не є істотною, оскільки найчастіше зберігаються не системи в цілому, а їхні окремі елементи. Крім того, тривалість їх збереження відносно невелика.

За стандартом збережуваність оцінюється двома основними показниками: середнім терміном збережуваності і гамма-відсотковим терміном збережуваності.

Середній термін збережуваності визначають за формулою

$$\bar{T}_{зб} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_{зб}, \text{ (років)}$$

де $t_{зб}$ – термін збережуваності i -х об'єктів.

Гамма-відсотковий термін збережуваності – це термін збережуваності об'єкта за умови, що його поточні значення підлягають нормальному закону розподілу випадкових величин. Його можна розрахувати наступним чином:

$$T_{збу} = T_{зб} - U(t_{зб})S, \text{ (років)},$$

де $U(t_{зб})$ – квантиль (значення, яке задана випадкова величина не перевищує з фіксованою ймовірністю) нормального закону розподілу терміну збережуваності; S – середнє квадратичне відхилення цього показника.

3.4. Показники довговічності

Вище було зазначено, що довговічність є однією з кількісних характеристик надійності, що є властивістю об'єкта виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі ТО і ремонтів.

Час роботи будь-якого технічного виробу (наробіток, напрацювання) до граничного стану, обумовленого в технічній документації, називають **ресурсом**.

Граничний стан зумовлюється фізичною стійкістю виробу, небезпечністю його подальшої експлуатації або економічними чинниками. Для багатьох технічних об'єктів це або час до капітального ремонту, або весь період експлуатації до фізичного чи морального спрацювання.

Чим менші затрати часу і коштів, які спрямовуються на відновлення працездатності об'єкта протягом усього періоду його експлуатації, тим вищою є його довговічність. Мірою довговічності технічного об'єкта може бути **коефіцієнт довговічності** R_d , який визначають за формулою

$$P_d = T_p / (T_p + \sum_{i=1}^n \tau_{ni}),$$

де T_p – час роботи машини за весь період експлуатації; $\sum_{i=1}^n \tau_{ni}$ – сумарний час простоїв машини через відмови (ремонт, регулювання тощо) за весь період експлуатації.

Сумарний час простою об'єкта через ремонт його деталі чи вузла (елемента) визначають за формулою:

$$\tau_{ni} = \frac{T_p}{T_i} \tau_i,$$

де T_i – наробіток i -го елемента об'єкта; τ_i – трудомісткість ремонту i -го елемента. Відношення T_p/T_i показує, скільки разів протягом періоду T_p ремонтувався i -й елемент.

Коефіцієнт довговічності є безрозмірною величиною ($P_d \leq 1$). Чим вище його значення, тим більш довговічним є об'єкт. Коефіцієнт довговічності кількісно дорівнює ймовірності того, що в певний довільно взятий момент часу об'єкт працює, а не ремонтується. Наприклад, якщо $P_d = 0,95$, то це значить, що 95% часу об'єкт працює, а 5% простоє за весь період експлуатації. Інакше кажучи, ймовірність того, що об'єкт працює в довільно взятий час, а не перебуває на ремонті або технічному обслуговуванні, становить 0,95.

Деякі інші показники довговічності технічних об'єктів, які обумовлені стандартами, а саме середній ресурс і середній термін експлуатації, обчислюють відповідно за наступними формулами:

$$\bar{T}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{pi}, \text{ (годин);}$$

$$\bar{T}_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{ei}, \text{ (років),}$$

де t_{pi} , t_{ei} – відповідно, ресурс і термін служби i -х об'єктів.

3.5. Комплексні показники надійності

Крім розглянутих показників надійності, кожний з яких характеризує одну із властивостей надійності, використовують також комплексні показники, що

оцінюють одночасно безвідмовність і ремонтпридатність. До них належать коефіцієнт готовності K_2 і коефіцієнт технічного використання $K_{тв}$.

Ці показники доцільно застосовувати для відновлюваних об'єктів, для яких дозволені відмови і короткочасні перерви в роботі протягом заданого часу роботи. Для таких об'єктів важливе значення має властивість готовності, тобто здатності перебувати у процесі експлуатації максимальний час у працездатному або готовому до застосування стані.

Розглянемо процес експлуатації відновлюваних об'єктів, для яких дозволені перерви в роботі (рис. 3.1). Хрестиками на цьому рисунку позначено моменти відмов, кружками – моменти закінчення відновлення і продовження експлуатації (тут видалено проміжки часу, коли об'єкт не працював з інших причин, окрім відмови).

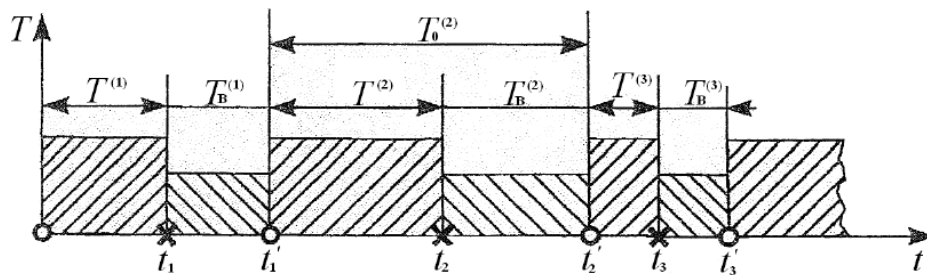


Рис. 3.1. Схема випадкового часового режиму експлуатації об'єкта:

$T^{(1)}, \dots, T^{(n)}$ – напрацювання між відмовами; $T_{г}^{(1)}, \dots, T_{г}^{(n)}$ – тривалість відновлень;

$T_0^{(i)}$ – час між $(i-1)$ та i -м відновленням; t_1, \dots, t_n – моменти виникнення відмов;

t_1', \dots, t_n' – моменти відновлення працездатного стану.

Коефіцієнтом готовності називають імовірність того, що система виявиться працездатною у довільно вибраний момент часу в усталеному процесі експлуатації:

$$k_{г} = \frac{m_{тп}}{m_{тп} + m_{тв}},$$

де $m_{тп}$ – середній наробіток до відмови відновлюваного об'єкта; $m_{тв}$ – середній час відновлення.

При визначенні коефіцієнта готовності не враховують заплановані періоди часу, протягом якого застосування об'єкта за призначенням не передбачене (наприклад, інтервали планового технічного обслуговування). Ці періоди враховує **коефіцієнт технічного використання**:

$$k_{\text{ТВ}} = \frac{m_{\text{тп}\Sigma}}{m_{\text{тп}\Sigma} + m_{\text{тв}\Sigma} + m_{\text{тО}\Sigma}},$$

де $m_{\text{тп}\Sigma} + m_{\text{тв}\Sigma} + m_{\text{тО}\Sigma}$ – відповідно математичні сподівання сумарних відрізків часу перебування об'єкта у працездатному стані, відновленні і на технічному обслуговуванні за деякий період експлуатації.

Зв'язок між двома розглянутими коефіцієнтами відображає наступне співвідношення:

$$k_{\text{ТВ}} = Y \frac{k_{\text{Г}}}{1 - k_{\text{Г}}},$$

де Y – частка часу експлуатації, що припадає на аварійний ремонт.

Коефіцієнт готовності характеризує готовність об'єкта до використання його за призначенням, тобто це ймовірність його перебування у працездатному стані в будь-який момент часу без урахування простоїв об'єкта на запланованому ТО, ремонті, зберіганні чи транспортуванні. Але цей коефіцієнт не враховує простоїв з організаційних причин (відсутність наряду на виконання робіт, виклик спеціалістів-налагоджувачів, доставка запчастин). Їх враховує **коефіцієнт оперативної готовності**:

$$k_{\text{ОГ}} = \frac{T_{\text{рб}}}{T_{\text{рб}} + T_{\text{в}} + T_{\text{орг}}},$$

де $T_{\text{рб}}$ – сумарна тривалість працездатного стану об'єкта; $T_{\text{в}}$ – сумарна тривалість усунення відмов об'єкта; $T_{\text{орг}}$ – простої об'єкта з організаційних причин.

Коефіцієнт збереження ефективності забезпечує врахування зміни ефективності об'єкта залежно від тривалості його перебування у працездатному стані. Його розраховують за відношенням показника ефективності використання об'єкта у технологічних процесах (наприклад, фактичний обсяг виконаної роботи $V_{\text{рф}}$) до номінального значення цього показника $V_{\text{рн}}$, визначеного за умови, що відмови об'єкта впродовж того самого періоду не виникають ($K_{\text{з}}=1$):

$$k_{\text{ЕВ}} = \frac{V_{\text{РФ}}}{V_{\text{РН}}}.$$

У разі різкого зниження коефіцієнта збереження ефективності експлуатаційникам потрібно передати об'єкт на капітальний ремонт або замінити його у технічній системі чи технологічній лінії.

3.6. Відмови технічних об'єктів. Характеристика відмов

Відмова – це подія, яка полягає у втраті об'єктом здатності виконувати необхідні функції, тобто у порушенні працездатного стану.

Відмови відповідно до фізичної природи їх виникнення пов'язані з руйнуванням деталей або їхніх поверхонь (поломка, спрацювання, корозія), втратою елементами виробів певних властивостей або параметрів (теплопровідності в теплових апаратах, електричного опору або електропровідності, магнітних властивостей та ін.) і зумовлюються різними процесами, що відбуваються в обладнанні під час експлуатації або збереження.

За швидкістю проходження процеси, які призводять до відмов виробів, поділяють на швидкоплинні, середньої швидкості й повільні.

Швидкоплинні процеси мають періодичність, що вимірюється частками секунди. Вони діють у межах циклу роботи технічного об'єкта (його елемента) і при наступних циклах виникають знову. До них належать вібрація вузлів, зміна навантаження і сил тертя залежно від взаємного розташування деталей та вузлів машини чи апарата під час роботи.

Процеси середньої швидкості пов'язані з періодом безперервної роботи виробу (елемента). Їхня тривалість вимірюється хвилинами, годинами. Вони приводять до поступової зміни параметрів або властивостей виробу. До цієї категорії належать оборотні (нагрівання в період пуску й охолодження при зупинці) та необоротні (спрацювання елементів тертя) процеси.

Повільні процеси проходять під час роботи виробу між періодичними оглядами або ремонтами за період повного спрацювання. Їхня тривалість

оцінюється днями, місяцями, роками. Такими процесами є: спрацювання основних механізмів виробу, перерозподіл внутрішніх напружень, повзучість металів, корозія, сезонні зміни температури (зима, літо), старіння. Ці процеси також впливають на технічні параметри виробів, але приводять до дуже повільної їх зміни. Проявлення дії повільних процесів упереджують за рахунок ремонтів і профілактичних заходів, які виконують через певні проміжки часу.

За впливом на стан виробу відмови поділяють на **функціональні й параметричні**. Наприклад, для насоса відмови, що зумовлюють його зупинку, належать до функціональних, а зменшення продуктивності або тиску нижче від граничного рівня — до параметричних. За наявності параметричних відмов технічний об'єкт може працювати з відхиленням від технічних вимог.

За можливістю подальшого використання виробів **відмови бувають повні**, що унеможливають застосування виробу за призначенням до їх усунення, і **часткові**, за яких виріб можна використовувати частково, наприклад з певною потужністю чи продуктивністю або з недостатньою точністю (для вимірювальних приладів).

За причинами виникнення (за походженням) відмови бувають **конструктивними**, що виникли внаслідок конструктивних недоліків об'єкта, **технологічними**, виникнення яких пов'язане з порушенням або недосконалістю технології виготовлення виробів, і **експлуатаційними**, причини виникнення яких пов'язані з умовами експлуатації чи використання виробів.

Процеси, що відбуваються в об'єктах під час експлуатації і збереження, та їхні відмови перебувають у причинно-наслідковому зв'язку. Причини відмов мають випадковий і систематичний характер.

Причини відмов випадкового характеру: непередбачені перевантаження, дефекти матеріалів або похибки виготовлення елементів об'єкта, не виявлені контролем, збої системи керування або помилки експлуатуючого персоналу.

Причини відмов систематичного характеру проявляються у результаті дії чинників із закономірними наслідками: спрацювання деталей, корозія і

накипання поверхонь теплопровідних елементів апаратів, затуплення лез різальних інструментів, забруднення фільтрів тощо. Систематичні причини відмов краще піддаються прогнозуванню.

Відповідно до характеру розвитку процесів та їх проявлення відмови можуть бути:

- раптовими, наприклад поломки деталей і заїдання пар тертя від перевантаження або через відсутність змащування;

- поступовими за розвитком і раптовими за проявленням, наприклад руйнування деталей або конструкцій від втоми матеріалу, коротке замикання внаслідок старіння ізоляції;

- поступовими (спрацювання, корозія, накипання, забруднення фільтрів, затуплення різальних інструментів та ін.).

Залежно від складності наслідків відмовам можна запобігати при технічному обслуговуванні, при середньому або капітальному ремонті.

За місцем усунення відмови поділяють на ті, які усувають в експлуатаційних умовах, і відмови, які усувають в умовах спеціалізованих ремонтних підприємств.

Проте є відмови, проявлення яких усувають в експлуатаційних умовах (заміною несправних елементів справними), а наслідки — в спеціалізованих умовах (ремонт елементів, що вийшли з ладу). Така система запобігання відмовам потребує наявності обмінного фонду швидкоспрацьовуваних елементів.

Експлуатація майже всіх виробів передбачає три періоди, що характеризуються різною інтенсивністю відмов (рис. 3.2): 1 – період припрацювання елементів виробу; 2 – період нормальної експлуатації; 3 – період інтенсивного спрацювання.

Протягом кожного з цих періодів переважаючі види відмов мають свої особливості.

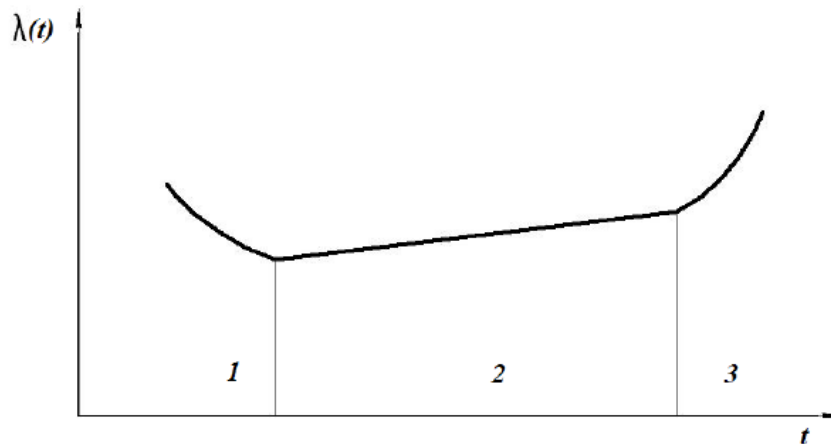


Рис. 3.2. Характерні періоди експлуатації технічного об'єкта.

Протягом першого періоду експлуатації виникають відмови припрацювання, пов'язані з тим, що не всі елементи виробу припрацювались, або з проявленням дефектів, що не були виявлені при його виготовленні. Відмови **другого періоду** називають відмовами періоду нормальної експлуатації. Вони зумовлені несприятливим поєднанням різних причин, у тому числі частковим спрацюванням елементів, серед яких немає таких, які б переважали. Протягом **третього періоду** відбуваються відмови, зумовлені тим, що стан основних функціональних елементів досягає граничного рівня і створюються умови для інтенсифікації відмов.

У процесі експлуатації технічних об'єктів наслідки відмов супроводжуються прямими і побічними затратами. Прямі затрати пов'язані безпосередньо з відновленням працездатності виробу. Побічні затрати зумовлені вимушеним простоюванням обладнання, псуванням сировини та продукції, іноді людськими жертвами.

Стандарт передбачає 22 різновиди відмов, які об'єднують у 7 груп за такими ознаками: впливом на працездатність об'єкта; джерелом виникнення; зв'язком з відмовами інших елементів; характером (закономірністю) виникнення і можливістю прогнозування; частотою виникнення (напрацюванням); трудомісткістю усунення; впливом на втрати робочого часу об'єкта на лінії.

3.7. Моделі відмов

У процесі експлуатації чи випробувань об'єкта події відбуваються випадково, а інтервали часу до настання події (між подіями) є випадковими тривалостями перебування об'єкта у певних станах, статистичне розсіювання яких зумовлене неоднорідністю структури матеріалів об'єкта, випадковою структури, хімічного складу та інших властивостей об'єктів, випадковим навантаженням їх під час експлуатації чи випробувань.

Розглядають наступні випадкові тривалості перебування об'єкта у певному стані:

- напрацювання до відмови;
- напрацювання між відмовами;
- напрацювання до критичної відмови;
- ресурс;
- термін експлуатації,
- термін збережуваності;
- час відновлення дієздатного стану.

Всі випадкові тривалості є неперервними і вимірюються в одиницях часу чи в одиницях, пропорційних часу (кількість робочих циклів, запусків, обертів тощо).

Вичерпною характеристикою будь-якої випадкової величини, у тому числі згаданих випадкових тривалостей, є імовірнісний розподіл цієї величини, чи функція розподілу. Незалежно від складності об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу напрацювання (модель відмов), і вся проблема оцінювання показників надійності об'єкта зводиться до оцінювання параметрів цього розподілу.

Установлення аналітичного виразу функції розподілу випадкових величин (напрацювання, ресурсу тощо) дає змогу визначити потрібні властивості й показники надійності (середні та гамма-відсоткові показники, ймовірність

безвідмовної роботи та ін.). У цьому разі вибір тієї чи іншої теоретичної моделі відмов забезпечує певну точність кількісних показників надійності.

Відповідно до ДСТУ 3433–96 [4] вибір моделі відмов технічного об'єкта, тобто *визначення аналітичного виразу функції розподілу, проводять на підставі аналізу:*

- статистичних даних напрацювань до відмови (на відмову);
- фізичних процесів деградації, які спричинюють відмову (граничний стан).

Перший підхід передбачає розгляд відмов як випадкових подій, а моделі відмов у цьому разі називають імовірнісними (статистичними).

Другий підхід ґрунтується на аналізі статистичних закономірностей перебігу фізичних процесів, які спричинюють відмови. При цьому параметри розподілу мають конкретну фізичну інтерпретацію, а моделі відмов називають імовірнісно-фізичними.

3.8. Суто ймовірнісні моделі відмов

Розглянемо найбільш використовувані теоретичні розподіли випадкових величин.

Нормальний розподіл. Одним із найбільш універсальних, зручних і широко застосовуваних для практичних розрахунків законів розподілу випадкових величин є закон розподілу Гауса (рис. 3.3). Універсальність цього закону полягає в тому, що його вважають основним законом, з якого випливають інші (показниковий, Релея, Вейбулла, Пуассона, біноміальний тощо).

Нормальний розподіл має місце тоді, коли зміна випадкової величини зумовлена багатьма причинами рівнозначного впливу. Йому підпорядковуються напрацювання до відмови і на відмову більшості відновлюваних і невідновлюваних виробів, які спрацьовуються і кородують, похибки вимірювань тощо.

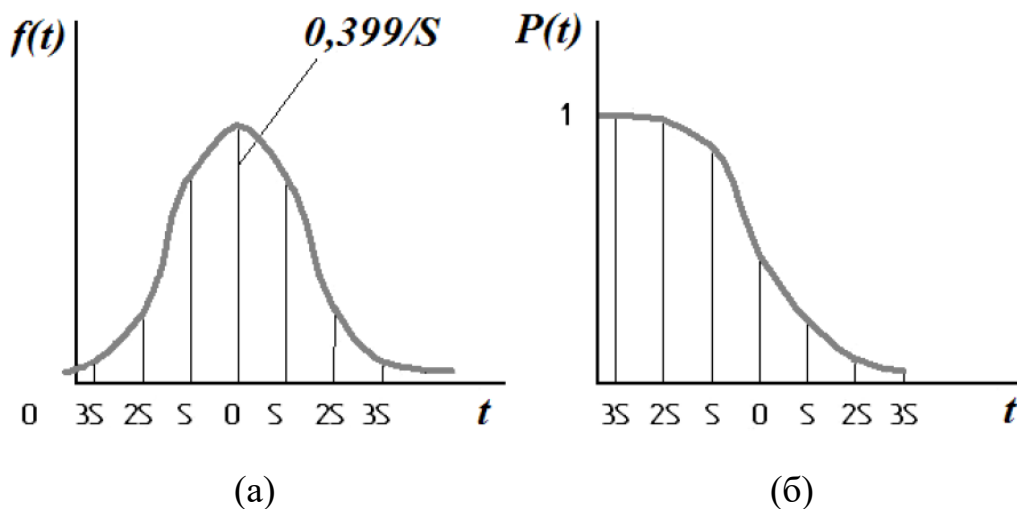


Рис. 3.3. Щільність ймовірності (а) та інтегральна функція ймовірності (б) нормального розподілу.

Функцію щільності розподілу розраховують за формулою

$$f(t) = \frac{1}{S_t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(1-m_t)^2}{2S_t^2}} .$$

Цей розподіл має два незалежних параметри: математичне сподівання m_t і середнє квадратичне відхилення S_t . Математичне сподівання в цьому законі розподілу визначає положення центра кривої на осі абсцис, а середнє квадратичне відхилення – ширину фігури, описаної цією кривою (рис. 3.3, а).

Логарифмічно нормальний розподіл. Розподіл випадкової величини набуває характеру логарифмічно нормального, коли за нормальним законом змінюється логарифм цієї величини. Цим законом описується напрацювання до відмови більшості деталей, особливо якщо відмови настають через втому металу чи старіння (наприклад, підшипників кочення чи ковзання).

Щільність розподілу (рис. 3.4) описується наступною залежністю:

$$f(t) = \frac{1}{S \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2S^2}} ,$$

де μ , S - параметри, які оцінюють за результатами спостережень чи випробувань.

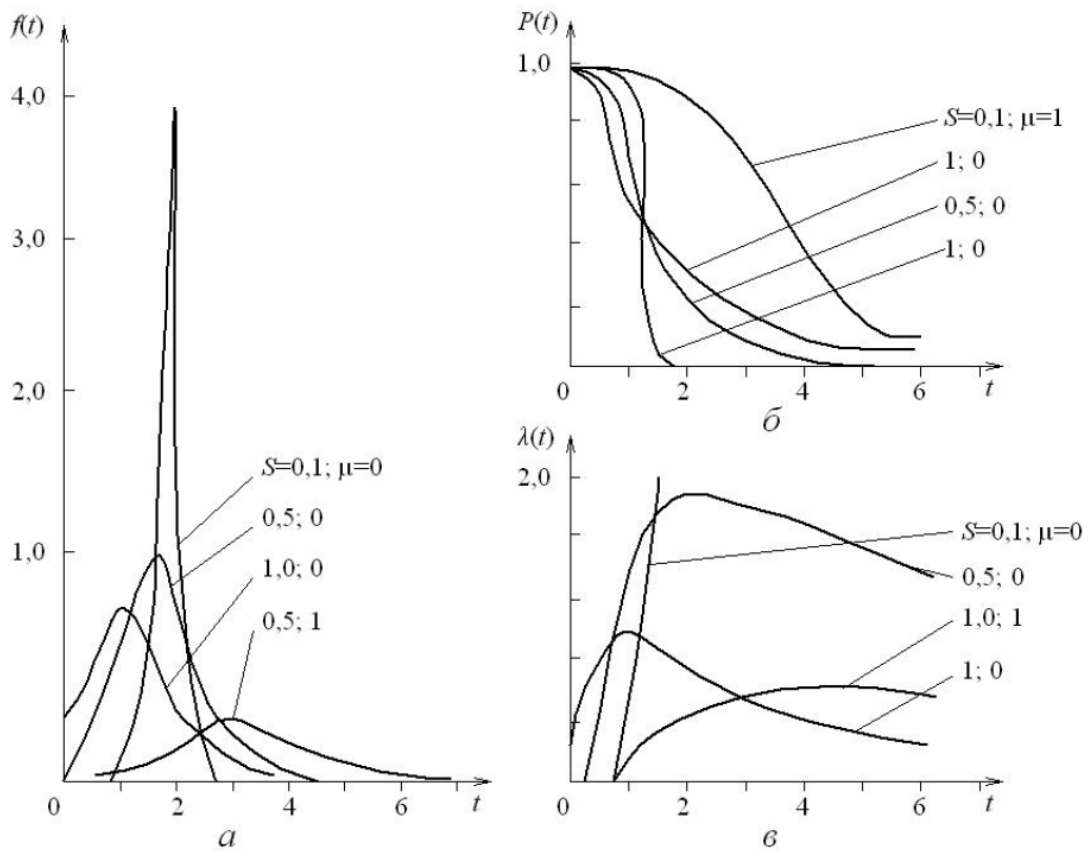


Рис. 3.4. Основна характеристика логарифмічно нормального розподілу: (а) – щільність імовірності $f(t)$; (б) – імовірність безвідмовної роботи $P(t)$; (в) – інтенсивність відмов $\lambda(t)$.

Розподіл Пуассона. При дослідженнях потоків відмов технічних об'єктів теплової енергетики за, наприклад, тижневі чи ододенні інтервали часу для опису їх закономірностей застосовують закон Пуассона, функція якого визначає ймовірність виникнення n -ї кількості відмов ($n=0, 1, 2, \dots$):

$$P_n(t) = \frac{(\omega t)^n}{n!} e^{-\omega t},$$

де ω – параметр потоку відмов досліджуваних об'єктів.

Графічно закон Пуассона зображується ламаними кривими, оскільки випадкові величини (у цьому разі – відмови об'єктів) є дискретними (рис. 3.5).

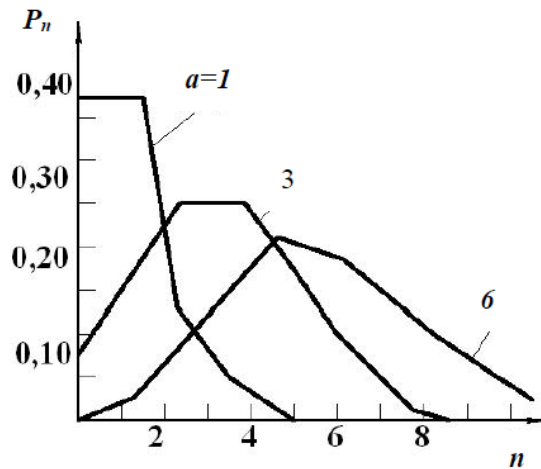


Рис. 3.5. Розподіли імовірностей виникнення відмов об'єктів з різними середніми інтенсивностями згідно із законом Пуассона.

Гамма-розподіл. Графіки гамма-розподілу наведені на рис. 3.6.

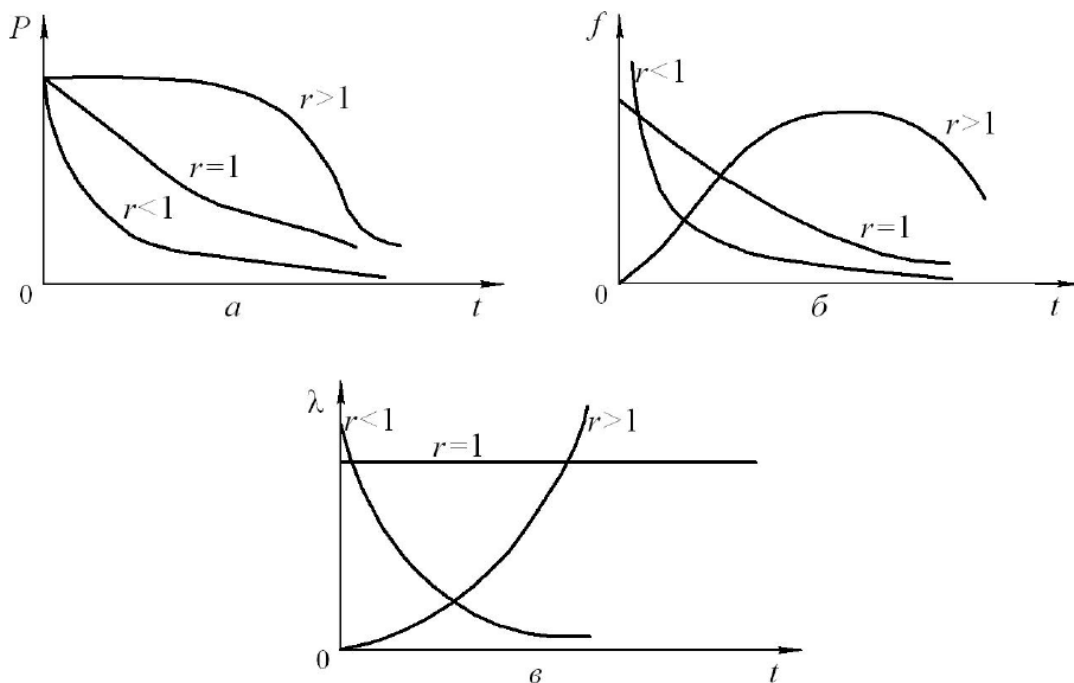


Рис. 3.6. Графіки гамма-розподілу: а — функції надійності; б — криві розподілу напрацювання до появи відмов; в — інтенсивності відмов.

Щільність гамма-розподілу

$$f(t) = \frac{\lambda_0^r}{\Gamma(r)} t^{r-1} e^{-\lambda_0 t} ,$$

де $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} t^{r-1} e^{-t} dt$, гамма-функція; r — параметр форми; λ_0 — параметр масштабу.

Математичне сподівання напрацювання до відмови і дисперсія визначаються за формулами

$$m_t = r/\lambda_0 ; \quad D_t = S_t^2 = r/\lambda_0^2 .$$

За великих значень r гамма-розподіл наближається до нормального розподілу. Гамма-розподіл дає змогу описати час виникнення відмов резервованих систем з увімкненням резерву способом заміщення та за умови, що потоки відмов основної та всіх резервних систем є найпростішими. У цьому разі параметр розподілу r дорівнює кількості всіх систем (основної та резервних).

Цей розподіл також може характеризувати час виникнення відмов складних електромеханічних систем, якщо відбуваються раптові відмови елементів на початковому етапі експлуатації або в процесі припрацювання системи. Тобто при $r < 1$ гамма-розподіл є зручною характеристикою часу виникнення відмов об'єктів протягом їхнього припрацювання.

Розподіл Вейбулла. Цей розподіл характеризується такими функціями (рис. 3.7):

- ймовірністю безвідмовної роботи

$$P(t) = e^{-t^m/t_0} ,$$

- інтенсивністю відмов

$$\lambda(t) = (m/t_0)t^{m-1} ,$$

- щільністю розподілу

$$f(t) = (m/t_0)t^{m-1}e^{-t^m/t_0} .$$

Математичне сподівання і середнє квадратичне відхилення визначають відповідно наступним чином:

$$m_t = Bmt_0^{1/m} ; \quad S_t = Cmt_0^{1/m} ,$$

де B_m і C_m — емпіричні коефіцієнти.

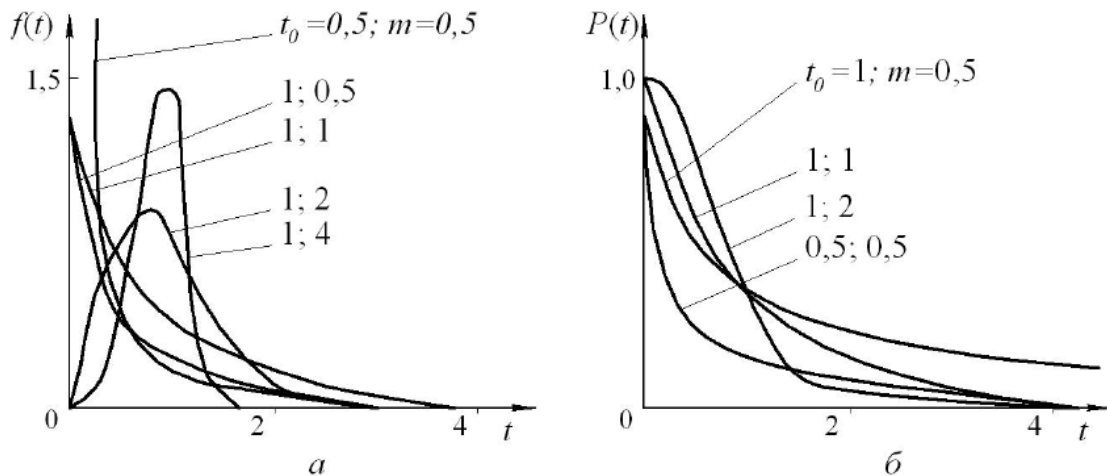


Рис. 3.7. Характеристики розподілу Вейбулла: а – щільність розподілу; б – функція надійності.

Експоненційний розподіл. Для експоненційного закону (рис. 3.8) сталою величиною є інтенсивність відмов, тобто

$$\lambda(t) = \lambda = \text{const};$$

$$\lambda = 1/m_t,$$

де m_t - математичне сподівання напрацювання до відмови, що визначається на підставі оброблення результатів спостережень чи випробувань:

$$m_t \approx \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i,$$

\bar{t} — середнє значення напрацювання; t_i — поточне значення напрацювання.

Якщо напрацювання виразити в годинах, то λ визначає кількість відмов за годину. В цьому разі загальний вираз для ймовірності безвідмовної роботи набуває вигляду

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda dt} = e^{-\lambda t}.$$

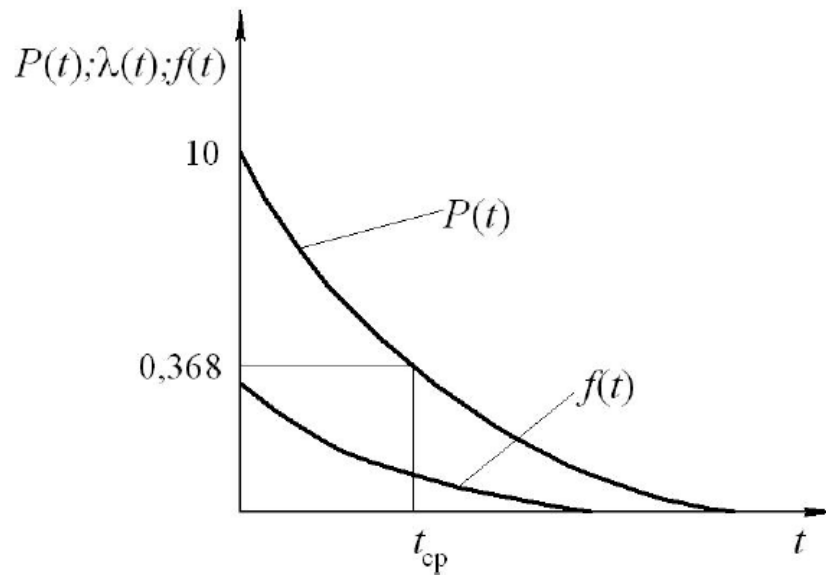


Рис. 3.8. Характеристики експоненційного розподілу.

Контрольні запитання

1. Чим характеризується потік відмов?
2. Якими показниками характеризується відновлення обладнання в процесі ремонту?
3. Якими характеристиками визначають довговічність?
4. Від яких чинників залежить коефіцієнт технічного використання?
5. Чим відрізняються функціональні і параметричні відмови?
6. Якими є основні ймовірнісні моделі відмов?

4. НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

4.1. Поняття технічної системи

Технічна система (ТС) – це сукупність спільно взаємодіючих об'єктів, призначених для виконання заданих функцій.

Система може охоплювати різні сукупності об'єктів. Як ТС можна розглядати автоматичну систему керування технологічним процесом (АСК ТП), двигун, турбіну, турбогенератор, комп'ютер або один із його периферійних пристроїв тощо.

У техніці також широко застосовують поняття **технологічна система**.

Технологічна система – це сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення, предметів виробництва та виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва заданих технологічних процесів або операцій (водопідготовка, підготовка палива тощо).

Систему, що відокремлюється за функціональною або структурною ознакою з технологічної системи вищого рівня, називають **підсистемою технологічної системи**.

Теорія надійності розглядає наступні типи технічних систем:

- послідовні,
- паралельні,
- комбіновані.

Об'єкти, що утворюють системи, є елементами систем.

У теорії надійності під **елементом системи** розуміють її частину, що має самостійну характеристику надійності та виконує певну функцію для забезпечення роботи системи. Елементами системи можуть бути, наприклад, турбіна, турбогенератор, насоси, котел тощо.

Система й елементи системи – поняття умовні. Те, що вважається системою в одній задачі надійності, може сприйматися як елемент в іншій. Навіть таку складну систему, як АСК ТП, можна розглядати як складовий елемент системи

– автоматизованого технологічного комплексу, до складу якого крім АСК ТП входить технологічний об'єкт керування (сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва).

Характеристики надійності елементів визначають у результаті аналізу фізичних процесів, при проведенні випробувань або з досвіду експлуатації. Характеристики надійності системи в цілому визначають з характеристик надійності елементів, що утворюють цю систему.

4.2. Резервування систем

Проектування будь-якого технічного об'єкта передбачає вибір такої конструкції, яка б мала найменшу кількість складових елементів, відмова яких призводила б до невиконання об'єктами якоїсь з покладених на нього функцій. Надійність таких об'єктів буде залежати від надійності слабких (ненадійних) ланок. В таких випадках застосовують резервування.

Резервування – метод підвищення надійності об'єкта завдяки введенню надмірної кількості його елементів.

Використовують наступні види резервування:

- структурне,
- функціональне,
- інформаційне,
- погодинне.

Структурне резервування передбачає введення надмірної кількості однакових елементів. При цьому надмірні резервні структурні елементи виконують робочі функції при відмові відповідних основних або протягом усього періоду функціонування об'єкта.

Функціональне резервування відбувається тоді, коли різні об'єкти або системи виконують подібні функції. Такий вид резервування найчастіше використовують для багатофункціональних об'єктів і систем. Так, тиск пари на виході котлоагрегата можна визначити за показаннями реєструвальних приладів

і зчитуванням цього параметра з інформаційно-вимірювальної системи, що розраховує техніко-економічні та інші показники.

Інформаційне резервування пов'язане з використанням надмірної інформації і передбачає можливість компенсації втрати інформації за рахунок її повторення або за рахунок передавання інформації запасним каналом. На більшості технологічних об'єктів завдяки внутрішнім зв'язкам, є інформаційна надмірність, яку часто використовують для перевірки достовірності інформації. Наприклад, усереднена витрата пари на виході парового котла відповідає усередненій витраті води на його вході, а витрата газу в котлі визначає витрату повітря при фіксованому складі димових газів.

Погодинне резервування передбачає використання надмірного часу і передбачає перерви у роботі об'єкта при відмові його елемента. Таким чином, на виконання системою заданих функцій передбачений час, більший за необхідний. Часто погодинне резервування, яке забезпечує безперервність технологічного процесу, здійснюється завдяки введенню резервних технологічних ліній, акумуляторних місткостей, складів палива та запчастин.

На практиці найчастіше застосовують структурне резервування, тому розглянемо його детальніше.

4.3. Структурне резервування

Структурне резервування може бути загальним і поелементним. Розрізняють загальне постійне, поелементне постійне, загальне заміщувальне, поелементне заміщувальне і ковзне (з дробовою кратністю), резервування систем і підсистем (рис. 4.1).

При **постійному резервуванні** (рис. 4.1, а, б,) резервні елементи працюють нарівні з основними, а тому немає потреби у пристроях, що включають в резерв. Такий вид резервування називають **пасивним**.

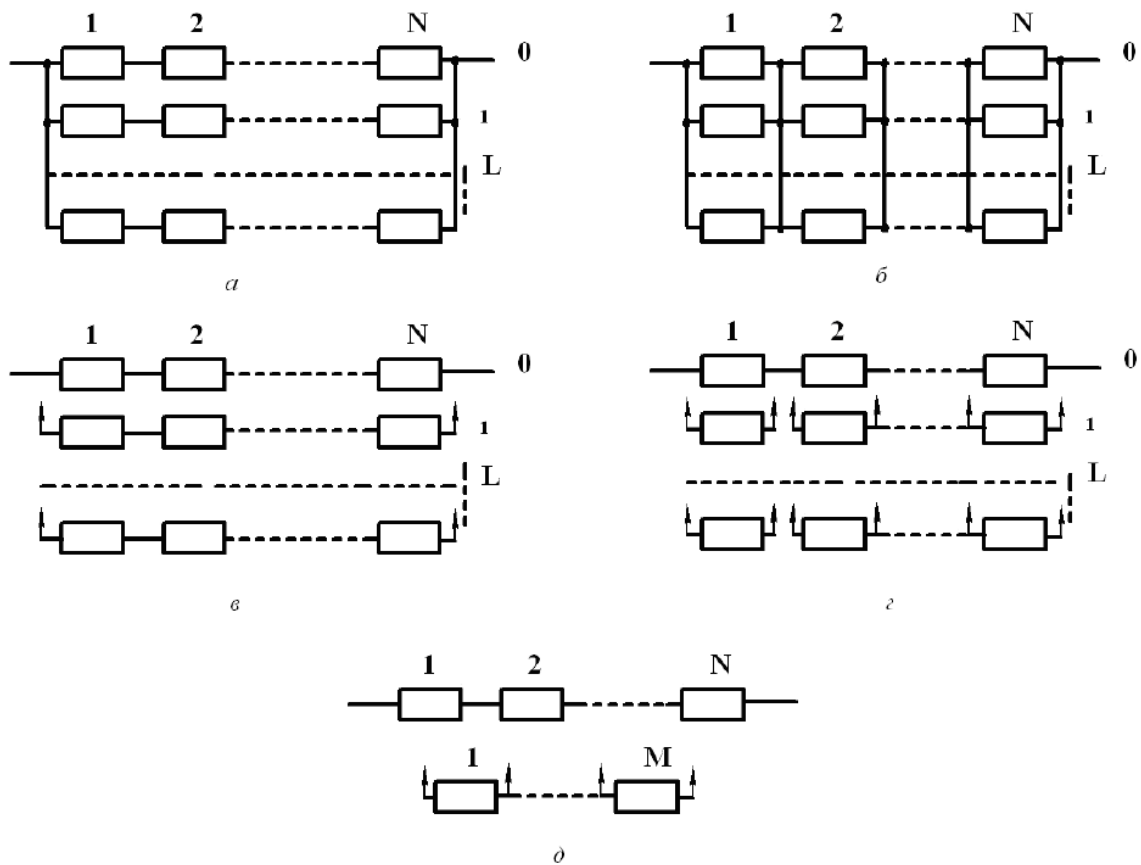


Рис. 4.1. Схема резервування: (а) – загального постійного; (б) – поелементного постійного; (в) – загального заміщувального; (г) – поелементного заміщувального; (д) – ковзного.

При *заміщувальному резервуванні* (рис. 4.1, в, г) у разі відмови основного елемента вмикається резервний, а тому такий вид резервування називають *активним*.

Ковзне резервування (рис. 4.1, д), який є окремим видом заміщувального, застосовують тоді, коли до складу системи входять однотипні елементи. Тоді група основних елементів може мати один або кілька резервних.

Відмова резервованих систем, наведених на рис. 4.1, а, б, настає лише тоді, коли відмовляють усі $L+1$ системи. Відмова резервованих систем, поданих на рис. 4.1, б, г, настає після відмови $L+1$ елементів, що належать до однієї з N резервних груп. Відмова системи при ковзному резервуванні (див. рис. 4.1, д) настане лише тоді, коли кількість основних елементів, що відмовили, перевищить кількість резервних.

У підсистемах АСК ТП застосовуються всі розглянуті схеми резервування. У системах автоматичного керування процесами в тепловій енергетиці застосовують здебільшого поелементне резервування заміщенням і ненавантаженим резервом (див. рис. 4.1, г).

Залежно від режиму роботи розрізняють такі види резервних елементів:

- навантажені (теплі), коли вони перебувають у полегшених робочих умовах і включаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента;
- ненавантажені (холодні), коли вони не навантажені і включаються в робочий режим після відмови працюючого основного елемента.

На рис. 4.2 відрізки прямих зображують можливі напрацювання основного T_0 і двох резервних T_1 і T_2 пристроїв. Очевидно, що при ненавантаженому резервуванні (рис. 4.2, б) напрацювання завжди більше, ніж при навантаженому резерві, а тому за інших однакових умов ненавантажений резерв надійніший, ніж навантажений.

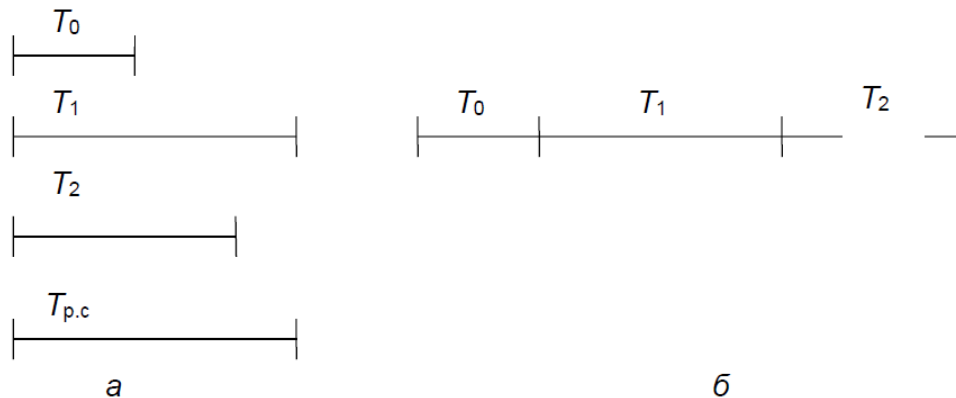


Рис. 4.2 Напрацювання до відмови T_{pc} резервованої системи, що складається з трьох пристроїв, при навантаженому (а) і ненавантаженому (б) резервах.

4.4. Кратність резервування

Співвідношення між кількістю резервних і основних елементів системи називають кратністю резервування:

$$k = (n - r) / r,$$

де n – кількість однотипних елементів; r – кількість необхідних для функціонування системи працюючих елементів.

Значення k може бути цілим, якщо $r=1$, та дробовим, якщо $r>1$. В останньому випадку, яким би не вийшов дріб, скорочувати його не можна. Якщо, наприклад, $k=4/2$, то це означає, що застосовано резервування з дробовою кратністю, причому для нормальної роботи об'єкта потрібно не менш як два елементи, а резервних – чотири. Якщо скоротити цей дріб і записати, що $k=2$, то це означатиме, що реалізовано резервування з цілою кратністю. Причому резервних елементи – два. Очевидно, що скорочення дроби змінило сутність резервування.

Структурне резервування пов'язане з додатковими витратами на резервні елементи. Вони мають окупатися за рахунок збільшення надійності об'єкта і зниження на його технічне обслуговування.

Показники ефективності резервування:

$$B_m = T_{p.c} / T; \quad B_{p.c} = P_{p.c} / P; \quad B_Q = Q / Q_{p.c},$$

де B_m – коефіцієнт підвищення середнього напрацювання до відмови резервованої системи $T_{p.c}$ порівняно з напрацюванням нерезервованої T ; $B_{p.c}$, B_Q – відповідно коефіцієнти підвищення ймовірності безвідмовної роботи P і зменшення ймовірності відмови Q . Резервування буде ефективним за умови, що B_m і B_p будуть більшими, а B_Q – меншим за одиницю.

4.5. Математичне оцінювання надійності систем

Технічні й технологічні системи з огляду на їх надійність є складними комплексами, скомпонованими в найрізноманітніших комбінаціях з окремих підсистем та елементів, що відрізняються між собою важливістю показників надійності та їхнім рівнем. Тому задачі визначення показників надійності таких систем багатоваріантні, але в їх розв'язанні можна виокремити два основних підходи.

Перший підхід. Будують структурну схему надійності системи і визначають показники її надійності з урахуванням впливу на ці показники всіх без винятку елементів системи, тобто здійснюють повне визначення надійності;

Другий підхід. Будують структурну схему надійності системи і за завчасно заданим критичним рівнем показників надійності елементів виділяють ті з них, що мають низьку надійність, яка є визначальною для системи в цілому. Надійність системи визначають за надійністю цих елементів, тобто розраховують надійність системи за визначальними елементами.

Системи можуть мати наступну структуру елементів:

- послідовну (послідовна система),
- паралельну (паралельна система, або система з резервуванням),
- комбіновану (системи можуть мати ділянки з послідовною та паралельною дією елементів).

Надійність послідовних систем. У техніці і енергетиці частіше використовують послідовні системи. Прикладом такої системи може бути технологічний ланцюг вироблення і транспортування електроенергії на ТЕС (рис. 4.3).

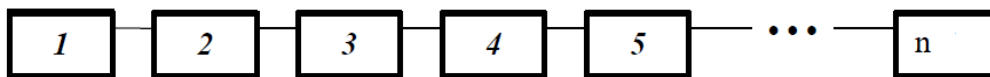


Рис. 4.3. Технологічний ланцюг вироблення електроенергії на ТЕС (послідовна система): 1 – котел; 2 – турбіна; 3 – турбогенератор; 4 – трансформатор; 5 – лінія електропередач; n – кінцевий (виконавчий) елемент системи.

У послідовних системах відмова будь-якого зі складових елементів призводить до відмови всієї системи. Ймовірність безвідмовної роботи системи в цьому разі визначається множенням імовірностей безвідмовної роботи складових елементів:

$$P(t) = P_1(t)P_2(t) \dots P_i(t) \dots P_n(t) .$$

Якщо ймовірність безвідмовної роботи всіх елементів є однаковою, то

$$P(t) = P_i^n(t) .$$

Отже, чим більше складових елементів, тим нижчою є надійність такої системи. Наприклад, система з 3 і 10 послідовних елементів, імовірність безвідмовної роботи кожного з яких становить 0,9, має загальну ймовірність безвідмовної роботи $P(t)=0,73$ і $0,35$, відповідно.

Надійність паралельних систем. Для підвищення надійності складних відповідальних систем застосовують резервування.

Резервування як метод підвищення надійності часто застосовують на практиці, особливо в системах, які гарантують безпеку людей (наприклад, на транспорті, в енергетиці), або в системах, що працюють у безперервному режимі і відмова яких може призвести до відчутних втрат за рахунок якості та кількості вироблених продуктів чи товарів, оброблюваної сировини або за рахунок побічних негативних ефектів.

Можна навести й інші показові приклади: використання в літаках 2–4 двигунів, кожний з яких здатний самостійно забезпечити політ, якщо інші двигуни не працюють; дво- і багатократне резервування системи гальмування транспортних засобів тощо. Використання запасних вузлів і деталей технічних об'єктів також можна розглядати як засіб резервування.

При **постійному резервуванні з навантаженням** («гарячим» резервом) резервні елементи або ланцюги елементів підключають паралельно до основних (рис. 4.4).

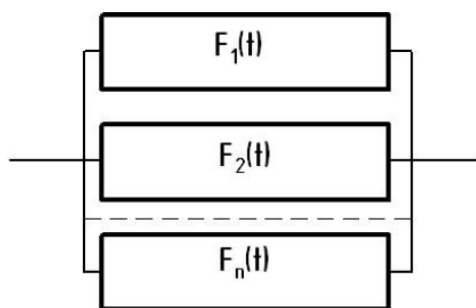


Рис. 4.4. Система з резервуванням.

Ймовірність відмови всієї системи визначають за теоремою множення ймовірностей відмови:

$$F(t) = F_1(t)F_2(t) \dots F_i(t) \dots F_n(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t) .$$

де $F_i(t)$ – ймовірність відмови i -го елемента. Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P(t) = 1 - F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) .$$

Якщо елементи системи рівнозначні, то

$$F(t) = F_i^n(t) ; \quad P(t) = 1 - F_i^n(t) .$$

Ці залежності у загальному вигляді характеризують гаряче резервування. Наприклад, якщо при гарячому резервуванні $P_i(t)=0,9$ і $n=2$, то $P(t)=0,99$, а отже, безвідмовність системи суттєво підвищується.

При *холодному резервуванні*, тобто резервуванні заміщенням, резервні елементи вступають у дію тільки після відмови основних. Резервні елементи можуть включатися в дію автоматично або вручну, а ті елементи, що відмовили, відновлюються або замінюються. У цьому разі для основного експоненційного закону розподілу відмов (за високої надійності складових елементів) ймовірність відмови системи становить:

$$F(t) \approx \frac{\prod_{i=1}^n F_i(t)}{n!} \approx \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i t}{n!} = Q(t) .$$

Для рівнозначних елементів це рівняння спрощується до виду

$$F(t) \approx \frac{F_i^n(t)}{n!} \approx \frac{(\lambda_i t)^n}{n!} .$$

Ці формули справедливі за умови, що надійність включення резерву гарантується повністю.

Надійність системи з резервуванням у період відновлення елемента, що відмовив. Такі періоди характерні й часто трапляються в роботі технологічних ланцюгів, особливо тих, які працюють у безперервному режимі. За інтенсивності відмов основного λ резервного λ_p елементів та середньої тривалості ремонту t_p ймовірність безвідмовної роботи системи можна розрахувати наступним чином:

$$P(t) = e^{\frac{-t}{T_0}} ,$$

$$\text{де } T_0 = \frac{1}{\lambda} \left[1 + \frac{1}{(\lambda + \lambda_p)t_p} \right].$$

У технологічних лініях за резерв беруть також накопичувачі, які розділяють ці лінії на ділянки. Робота ліній на накопичувачі, або за їхній рахунок, дає змогу за період накопичення, тобто за час використання резерву, ліквідувати відмову на ділянках між накопичувачами. Безвідмовна робота лінії повністю забезпечується, якщо місткості накопичувачів вистачає на період відновлення дієздатності ділянки, де відбулася відмова.

Надійність паралельних систем при «теплому» резервуванні. Прикладом такої системи може бути багатократна клинопасова передача, в якій кілька пасів не повністю завантажені («тепле» резервування) і включаються в роботу тільки після руйнування деякої кількості робочих елементів.

Наведений нижче розрахунок застосовують для резервування високонадійними елементами з експоненційним розподілом імовірності безвідмовної роботи. Якщо інтенсивність відмови основного λ і резервного, що працює в полегшеному режимі, λ_p елементів, то ймовірність безвідмовної роботи системи становить при n -кратному резерві

$$P(t) = 1 - \frac{\lambda(\lambda + \lambda_p) \dots (\lambda + n\lambda_p)}{(n+1)!} t.$$

Надійність комбінованих систем. Комбіновані системи охоплюють ділянки з послідовно і паралельно діючими складовими елементами. Якщо в системі a елементів не дубльовані і b елементів дубльовані (рис. 4.5), то ймовірність безвідмовної роботи системи визначають за формулою

$$P(t) = P_a(t)P_b(t),$$

де $P_a(t)$, $P_b(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи ділянок відповідно з послідовно і паралельно діючими елементами.

При послідовному з'єднанні елементів маємо

$$P_a(t) = \prod_{i=1}^a P_i(t).$$

Для повного гарячого резервування маємо

$$P_b(t) = 1 - \prod_{j=1}^b F_j(t).$$

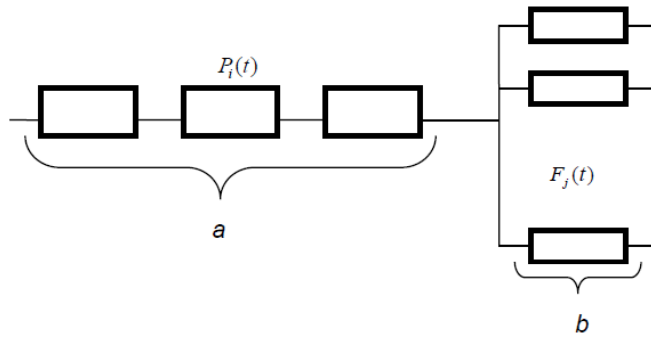


Рис. 4.5. Комбінована система з послідовним і паралельним з'єднанням елементів.

4.6. Способи зменшення інтенсивності відмов

При проектуванні технічних систем слід пам'ятати, що чим простіша система, тим вищим буде рівень її надійності.

У загальному випадку інтенсивність відмов системи можна зменшити такими способами:

1. **Спрощенням системи.** Зменшуючи кількість елементів, можна істотно підвищити її надійність (рис. 4.7). Ефект буде тим більшим, чим нижча надійність елементів і чим складніша система.

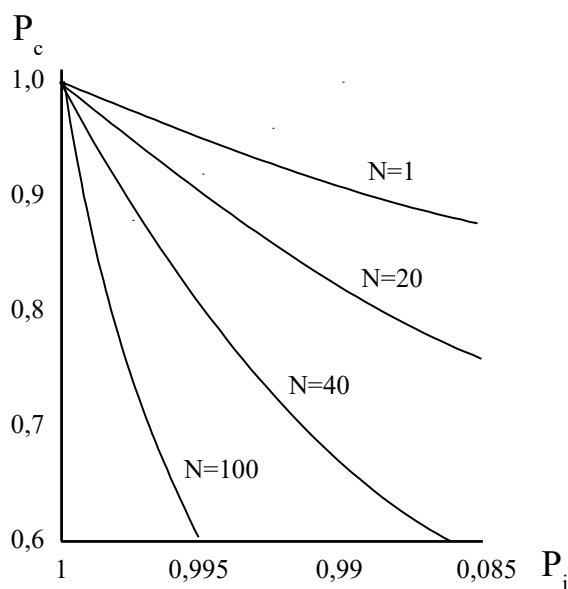


Рис. 4.7. Залежність імовірності безвідмовної роботи системи від кількості елементів N та імовірності їх безвідмовної роботи P_i .

2. **Вибором надійніших елементів.** Водночас підвищення надійності елемента часто призводить до збільшення маси системи, габаритних розмірів і вартості.

3. **Полегшенням режимів роботи елементів** завдяки зменшенню впливу зовнішніх чинників та полегшенню режимів роботи. Спосіб є ефективним тоді, коли елементи працюють з перевантаженням. При цьому потрібно полегшувати режими роботи насамперед тих елементів, відмови яких призводять до відмов системи, а не до погіршення її характеристик.

4. **Відбракуванням малонадійних елементів** за результатами випробувань елементів у важких умовах роботи, які можна погіршити, збільшуючи навантаження або задаючи негативні режими впливу зовнішніх чинників.

5. **Створенням схем з обмеженими наслідками відмов елементів.** Відмови елементів складної технічної системи нерівноцінні, а тому потрібно при аналізі їхніх наслідків урахувувати коефіцієнти впливу на загальну надійність системи. Проектувати системи з обмеженими наслідками відмов треба так, щоб відмова елемента призводила не до втрати її працездатності, а лише до погіршення окремих характеристик у межах працездатного стану.

6. **Стандартизацією й уніфікацією елементів системи.** Висока надійність таких складових є наслідком того, що вони доведені до належного технічного рівня завдяки їх постійному вдосконаленню. Застосування стандартних деталей і вузлів дає змогу знизити інтенсивність відмов системи і скоротити середній час відновлення працездатності.

7. **Удосконаленням технології виробництва та її автоматизацією і роботизацією.** Ці заходи дають можливість забезпечити експлуатаційну стабільність характеристик елементів і систем.

8. **Статистичним контролем якості,** що дає змогу виявити чинники, які погіршують технологію виробництва елементів і систем, вплинути на їхню якість і відбракувати непрацездатні.

9. *Профілактичними заходами*, спрямованими на попередження відмов, які передбачають постійний контроль за технологією виробництва систем та їхніх елементів, а також забезпечення належної експлуатації і вчасного технічного обслуговування.

У процесі експлуатації надійність будь-якого технічного об'єкта чи системи знижується. Зменшивши сумарний час їх роботи, можна збільшити час існування у працездатному стані.

Час безперервної роботи, наприклад, автоматичної системи можна скоротити за рахунок багаторазового її вмикання і вимикання. Це можливо у тих випадках, коли для керування об'єктом немає необхідності тримати ввімкненою систему протягом усього часу його експлуатації. Такими системами є, зокрема, системи коригування технологічних процесів енергообладання. Проте зберегти надійність системи за рахунок скорочення часу її безперервної роботи можна лише тоді, коли кількість вмикань і вимикань є порівняно невеликою. При частих вимиканнях і вмиканнях перехідні процеси можуть мати настільки значний шкідливий вплив, що такий режим роботи стане недоцільним.

Помітний ефект дає скорочення часу безперервної роботи резервованої системи (рис. 4.8).

За великого напрацювання (t_1) ймовірності безвідмовної роботи резервованої і нерезервованої систем мало відрізняються одна від одної. З його зменшенням до t_2 імовірність безвідмовної роботи резервованої системи 1 буде значно більшою, ніж нерезервованої ($\Delta P_p \gg \Delta P_0$).

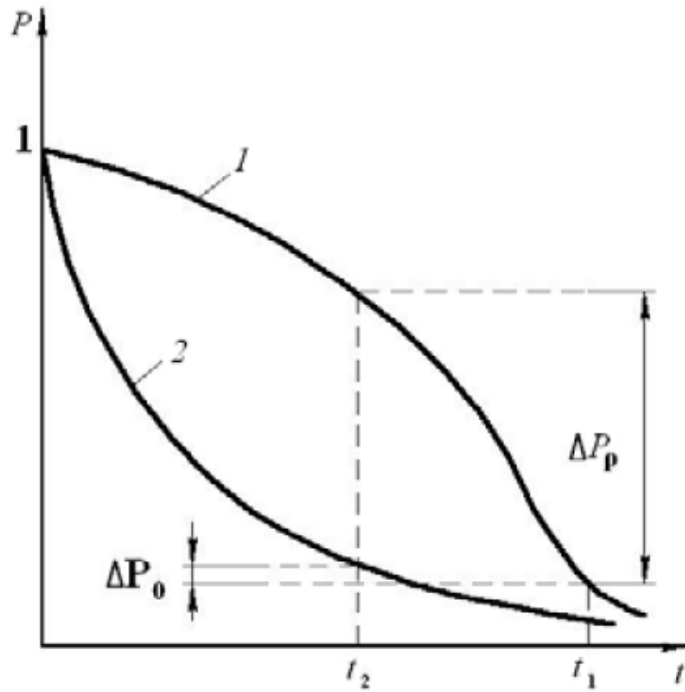


Рис. 4.8. Виграш збільшення ймовірності безвідмовної роботи резервованої (1) і нерезерованої (2) систем при скороченні часу безперервної роботи.

4.7. Вплив резервування на надійність

Значні переваги резервування полягають у можливості проектування надійних систем з малонадійних елементів. Ефективність резервування часто оцінюють зменшенням імовірності відмов (виграш надійності):

$$G_Q(t) = \frac{1 - e^{-\lambda_c t / C}}{1 - e^{-\lambda_c t}}$$

де C – коефіцієнт, який показує, у скільки разів інтенсивність відмов резервованої системи менша за інтенсивність нерезерованої; λ_c – інтенсивність відмов системи.

Виграш надійності $G_Q(t)$ асимптотично наближається до одиниці (рис. 4.9) незалежно від надійності резервованої системи та її елементів. Чим менша надійність нерезерованої системи і кратність резервування резервованої, тим більшою є крутість зростання G_Q , а отже, тим менш доцільним з часом для таких систем стає резервування.

При ковзному резервуванні з дробовою кратністю значення G_Q , що починається з певного напрацювання, стає більшим за одиницю і таке резервування стає недоцільним. Виграш надійності резервованої системи порівняно з нерезерованою тим більший, чим менший час безперервної роботи системи і чим надійніша система резервується, що є основним протиріччям резервування. Виграш надійності за інтенсивністю відмов системи якісно не відрізняється від G_Q .

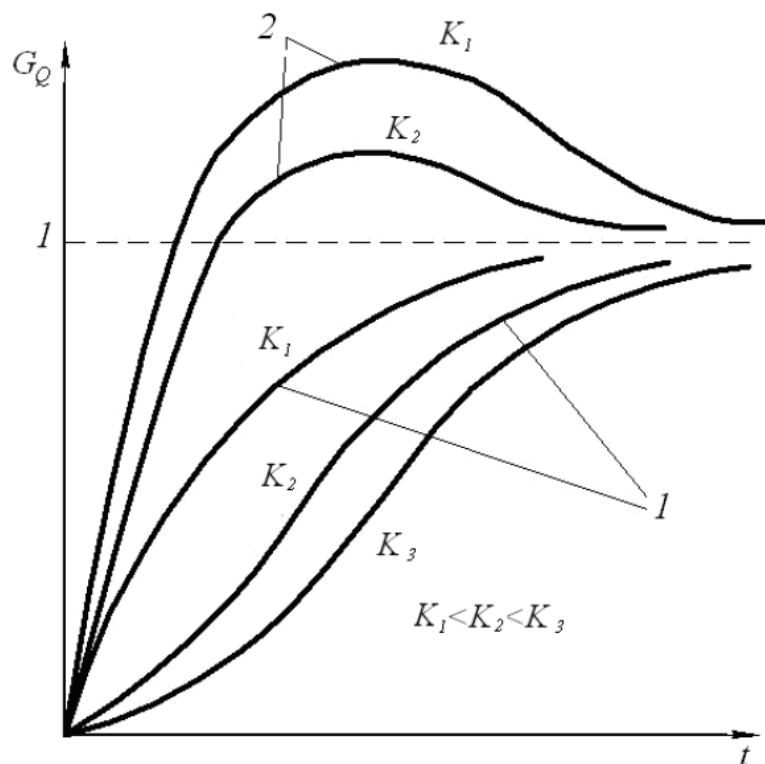


Рис. 4.9. Залежність виграшу надійності за ймовірністю відмов від часу t_i і кратності резервування: 1 – резервування з цілою кратністю; 2 – резервування з дробовою кратністю.

Таким чином: 1. Резервування вигідно застосовувати для систем, які розраховані на невеликий термін безперервної роботи. 2. Використання резервування для систем з тривалим часом безперервної роботи здебільшого потребує збільшення його кратності. 3. Надійність систем підвищується при

резервуванні на фоні збільшення їх маси, габаритних розмірів, вартості та ускладнення умов експлуатації.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється технічна і технологічна система?
2. Які типи технічних систем існують?
3. Які види резервування застосовують в енергетиці?
4. Як визначається кратність резервування?
5. Як визначається надійність комбінованої системи?

5. ВИПРОБУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ

5.1. Види випробувань

Традиційні технічні розрахунки не дають точних кількісних показників надійності виробів. Визначення їх за допомогою аналізу структурних схем об'єктів за проектними значеннями показників надійності елементів має приблизний характер, оскільки ґрунтується на усереднених статистичних даних без урахування впливу різноманітного поєднання експлуатаційних чинників. Більш точні прогнози дають імовірнісні поелементні розрахунки надійності, проте вони розроблені для обмеженої кількості елементів.

Найточніше показники надійності виробів визначають і підтверджують експериментально трьома способами:

- збирання й оброблення статистичних даних (анкетування),
- випробування (визначальні, контрольні),
- підконтрольна експлуатація.

Досвід показує, що анкетування може давати цінні відомості про перебіг експлуатації виробів, але практично непридатне для повного оцінювання їх якості. У переважній більшості випадків показники надійності виробів визначаються або підтверджуються випробуваннями, які залежно від поставлених цілей бувають визначальними і контрольними.

Визначальні випробування характерні для стадій проектування виробів. Їх проводять для початкового визначення або уточнення розрахованих оцінок показників надійності й виконують безпосередньо проектувальники разом із замовниками або спеціальні випробувальні центри.

У процесі серійного виробництва технічних об'єктів існує постійна потреба підтверджувати рівень їх надійності. Для цього проводять контрольні випробування, які бувають приймальними і періодичними. **Приймальні випробування** проводять стовідсотково або вибірково. Їхня тривалість, як правило, не перевищує тривалості періоду припрацювання виробу. **Періодичним**

контрольним випробуванням підлягають вибірки з серії технічних об'єктів, обсяг і терміни випробувань яких залежать від серійності виробництва і складності виробів.

Частіше випробовують об'єкт у цілому, але вдаються також до повузлових і поелементних випробувань, особливо коли розв'язуються проблеми вузьких із погляду надійності елементів виробів.

Точні оцінки показників надійності потребують випробування великої кількості зразків виробів протягом тривалого часу, що спричинює великі матеріальні затрати. Щоб зменшити затрати і прискорити одержання результатів, удаються до обґрунтованого **скорочення обсягів випробувань** за кількістю зразків і тривалістю їх випробувань.

Обсяги випробувань скорочують також завдяки **форсуванню їх режимів**, зменшенню кількості випробуваних зразків за рахунок тривалості випробувань або за рахунок підвищення точності вимірів, використання і всебічного аналізу всіх видів інформації про надійність технічного об'єкта.

Скоротити і прискорити випробування можна, використавши метод **наукового планування експериментів**.

Значення показників надійності, отримані при **випробуванні вибірок** можуть відрізнятися від реальних значень, оскільки до них потрапляє обмежена кількість довільно вибраних зразків. Для підтвердження адекватності результатів випробувань і реальних значень показників надійності установлюють верхню P_v і нижню P_n границі довірчої ймовірності, в межах яких знаходять значення показника властивості надійності P за результатами випробувань, прийнятих для оцінювання показників надійності конкретного виробу.

Ймовірність того, що дійсне значення показника, який оцінюється, знаходиться у довірчому інтервалі

$$In(P_n \leq P \leq P_v) = \beta,$$

називають **довірчою ймовірністю**.

У такий спосіб можна оцінювати будь-які показники надійності і, отже, існують верхні й нижні ймовірнісні межі показників безвідмовної роботи P_v і P_n , напрацювань на відмову T_v і T_n , середньої тривалості відновлення $T_{B.H}$ і $T_{B.B}$.

Символ β означає *двосторонню довірчу ймовірність*, тобто ймовірність потрапляння параметра в інтервал, обмежений зверху і знизу.

Для практичних потреб частіше застосовують *односторонню оцінку* α , коли кількісне значення показника є не меншим за нижню границю $I_m(\Pi_n < \Pi) = \alpha$ (наприклад, для ймовірності безвідмовної роботи, середнього напрацювання на відмову), або не більшим від верхньої границі $I_n(\Pi < \Pi_v) = \alpha$ (наприклад, для середньої тривалості відновлення дієздатності виробу).

Оцінка α — це *одностороння довірча ймовірність* знаходження параметра з потрібної сторони встановленої довірчої границі.

Значення α на стадії випробувань експериментальних зразків виробів беруть таким, що дорівнює 0,7...0,8, а на стадії передачі у серійне виробництво — 0,9...0,95. Менші значення вибирають для дрібносерійного виробництва і великозатратних випробувань.

Верхні й нижні довірчі границі показників надійності для невідновлюваних і відновлюваних виробів визначають по-різному.

5.2. Випробування невідновлюваних виробів

Для невідновлюваних виробів розглядають два варіанти оцінки нижньої Π_n і верхньої Π_v довірчих границь нормованих показників надійності:

- для вибірок менших ніж одна десята генеральної сукупності виробів – за біноміальним законом розподілу,
- для більших вибірок – за нормальним.

За першого варіанту виходять із того, що при випробуваннях n виробів вихід за кожною з довірчих границь беруть таке, що дорівнює ймовірності появи в

одному випадку не більше ніж m відмов, а в іншому – не менш як m відмов.

Довірчу ймовірність $(1-\alpha)$ визначають за такими формулами:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - P_H)^i P_H^{n-i} = 1 - \alpha ;$$

$$\sum_{i=m}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - P_B)^i P_B^{n-i} = 1 - \alpha .$$

На основі поданих вище формул будують графіки, за якими можна знайти P_H і P_B для різної кількості n випробуваних об'єктів при різних рівнях α і β .

5.3. Випробування відновлюваних виробів

Відновлювані вироби випробують із їх заміною або відновленням у них елементів, що відмовили. Метою випробувань найчастіше буває визначення напрацювання на відмову, для якого найсправедливішим є експоненційний закон розподілу випадкових величин.

Середнє напрацювання на відмову визначають за співвідношенням

$$T = t_{\Sigma} / m ,$$

де $t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i$ – сумарна тривалість випробувань n об'єктів з тривалістю t_i ; m – загальна кількість відмов протягом випробувань.

5.4. Форсування випробувань

Найточніші дані отримують у результаті випробування з максимальним наближенням умов їх проведення до умов використання випробуваних виробів. Однак такі випробування мають значну тривалість, унаслідок чого затримуються висновки і заходи за їх результатами. Тому застосовують різні методи *форсування випробувань*.

Найчастіше використовують спосіб *форсування за рахунок підсилення режимів випробувань*, чим досягають скорочення тривалості випробувань у кілька разів. Для цього випадку оцінюваний *показник надійності* Π для нормальних умов роботи технічного об'єкта обчислюють через коефіцієнт

підсилення K_n (або критерій подібності) і значення фактичного показника P_f , одержаного при випробуваннях у форсованому режимі, коригується:

$$P = P_f K_n .$$

Пряме підсилення режиму можливе тільки в межах, коли не змінюється характер співвідношення між оцінюваними параметрами і показником, за яким форсується режим. Тобто форсування має змінювати лише інтенсивність процесів, що відбуваються в об'єкті випробувань, а не замінювати одні процеси іншими.

Наприклад, режими випробувань деталей, які працюють в умовах пружної деформації, можуть форсуватися тільки у межах пружної деформації. Для вузлів тертя граничними умовами випробувань можуть бути режими, які не приводять до схоплювання деталей.

Для деяких чинників співвідношення значень показників для нормального P і форсованого P_f режимів, за якими визначають коефіцієнт K_n , відомі. У загальній формі вони мають вигляд

$$K_n = (P_f/P)^m .$$

Показник ступеня m у цьому рівнянні, наприклад для співвідношення границь міцності для форсованого і нормального режимів при випробуваннях об'єктів на втому становить: для деталей з поліпшеної і нормалізованої сталі - 6, для деталей із загартованих сталей - 9...12.

При контактних навантаженнях деталей $m=6$, а при спрацюванні в умовах недостатнього змащування $m=1...2$. При визначенні ресурсу мастил з форсуванням випробувань за рахунок температури беруть таке значення m : для органічних - 7, неорганічних - 4...6.

Для виробів, які працюють зі змінними режимами, випробування можна форсувати за рахунок зменшення тривалості, за винятком періодів незначного і малозначного навантаження.

Графіки, наведені на рис. 5.1, показують можливість зменшення кількості випробуваних зразків для невідновлюваних виробів за рахунок оцінювання

надійності за відсутності або малої кількості відмов. Із графіків видно, що один і той самий нижній довірчий рівень справедливий для різної кількості випробуваних зразків об'єктів, бо $x=1-m/n$ і для підтвердження будь-якого нижнього рівня показника надійності, наприклад, імовірності безвідмовної роботи, можна використовувати всі значення n . Причому, для $n=50$ можна задавати найбільшу граничну кількість відмов, а для $n=10$ – найменшу.

Хоча такий спосіб форсування випробувань підвищує ризик не підтвердити (зменшити) показники надійності, виготовлювачі виробів ідуть на нього, виграючи на обсягах і тривалості випробувань.

Мінімальну кількість зразків для випробування невідновлюваних виробів визначають із умови, що відмови не відбудуться ($m=0$) за значенням нижнього довірчого рівня показника надійності:

$$P_H = \sqrt[n]{1-\alpha}.$$

де n – кількість випробувань; α – одностороння довірна ймовірність. Після логарифмування цього рівняння отримаємо мінімальну кількість зразків

$$n_{min} = \frac{\lg(1-\alpha)}{\lg P_H}.$$

Зменшити кількість випробуваних зразків відновлюваних виробів можна також за рахунок збільшення тривалості періоду випробувань. При цьому, визначаючи показники, що мають експоненційний розподіл, сумарний обсяг випробувань $t_{\Sigma}=nT$ залишають постійним, пропорційно зменшуючи кількість випробувань n , а результати випробувань перераховують на заданий час.

Для великогабаритного обладнання теплоенергетики, яке найчастіше випускається дрібними серіями, випробування є ускладненими. Тому визначальні й контрольні випробування такого обладнання не проводять, а замінюють їх підконтрольною експлуатацією, під час якої оператор систематично спостерігає за роботою устаткування.

5.5. Періодичні контрольні випробування

Задані параметри надійності при виробництві виробів підлягають перевірці з проведенням *періодичних контрольних випробувань*, які проводять з вибіркою виробів. Таких випробувань зазнають зразки нового і модернізованого серійного обладнання за зміни конструкції і технології виготовлення або при заміні матеріалів і комплектуючих елементів.

При плануванні контрольних випробувань основним завданням є:

- визначення виду плану (методу) випробувань,
- кількості випробуваних зразків,
- тривалості випробувань,
- обґрунтування приймальної та бракувальної межі для конкретних об'єктів.

Контрольні випробування найпростіше проводити за одноступінчастим методом, а остаточні висновки про рівень надійності об'єкта робити після повного закінчення призначеної тривалості випробувань. Цей метод доцільно застосовувати для контролю показників надійності невідновлюваних виробів і для контролю середньої тривалості відновлення відновлюваних виробів.

Широко також використовують *послідовний метод контрольних випробувань*, за яким оцінюють показники надійності після кожної чергової відмови, результати кожного ступеня випробувань порівнюють із вимогами технічної документації, а після цього приймають рішення забракувати, прийняти вироби чи продовжити випробування.

Послідовний метод є ефективним для контролю середнього напрацювання на відмову відновлюваних виробів.

Для визначення кількості випробувальних зразків і тривалості їх випробувань використовують такі вихідні дані:

- ризик виготовлювача α ,
- ризик споживача β ,
- бракувальний і приймальний рівні контрольованого показника.

Ризик виготовлювача – імовірність того, що за результатами випробувань вибірки бракують партію якісних виробів, рівень надійності яких відповідає або перевищує заданий технічною документацією.

Ризик споживача – ймовірність того, що за результатами випробувань вибірки приймають партію виробів, рівень надійності яких нижчий від заданого.

Значення α_s і β_c вибирають із ряду чисел 0,05, 0,1, 0,2. Найприйнятнішою є умова, коли $\alpha_s = \beta_c$. У загальному машинобудуванні найчастіше беруть $\alpha_s = \beta_c = 0,2$.

Бракувальний рівень P_β контрольованого показника надійності, як правило, вибирають таким, що дорівнює нижчому за якістю граничному значенню, заданому в технічних умовах на об'єкт: ($P_\beta = P_H$).

Приймальний рівень P_α вибирають вищим за бракувальний у певному співвідношенні. Для ймовірнісних показників надійності прийнятним може бути співвідношення

$$P_\alpha \geq P_\beta + 0,5 .$$

Для показників надійності, заданих у фізичних одиницях, користуються ще таким співвідношенням:

$$P_\alpha = (1,5 \dots 15)P_\beta .$$

Вибираючи рівні показників, ураховують такі техніко-економічні чинники:

- вартість технічних об'єктів;
- розмір партії виробів;
- складність випробувань;
- тип контрольованого показника надійності.

Результати контрольних випробувань, нижчі за якістю від бракувального рівня, дають підстави для безумовного бракування партії виробів.

При отриманні результатів випробувань, що дорівнюють або вищі від приймального рівня, визнають позитивними для приймання виробів.

Якщо за результатами випробувань показники надійності лежать між приймальними і бракувальними рівнями, приймають рішення про продовження

випробувань і остаточні висновки щодо якості виробів роблять за сумарними результатами.

Для невідновлюваних виробів, які випробовують за одноступінчастим планом, вибірку n і допустиму кількість відмов m протягом заданого часу випробувань визначають за такими формулами:

$$\sum_{i=0}^m \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - P_{\alpha})^i P_{\alpha}^{n-i} = 1 - \alpha_B ;$$

$$\sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (1 - P_{\beta})^i P_{\beta}^{n-i} = 1 - \beta_C .$$

5.6. Прогнозування і забезпечення надійності виробів

Кожний технічний об'єкт теплоенергетики має такі періоди існування:

- проектування,
- виробництво,
- експлуатацію.

Проблеми надійності технічних виробів у кожному з цих періодів мають свої особливості й розв'язуються по-різному.

В період проектування рівень надійності виробів закладається, при їх виробництві — забезпечується, а при експлуатації — підтримується.

Заходи, що визначають надійність виробів у кожному з періодів існування, поділяють на загальні (стратегічні) і часткові (тактичні).

Період проектування. У період проектування майбутня надійність технічних виробів залежить насамперед від загального рівня розвитку галузі, в якій проектуються вироби, від ефективного застосування в ній загальних організаційно-технічних заходів з підвищення надійності, тобто від того, як підтримуються добрі традиції проектного колективу, кваліфікація персоналу, його досвід і знання галузі, для якої ведеться проектування, від роботи інформаційних служб, ефективності прямих і зворотних зв'язків з машинобудівниками і експлуатаційниками.

Тому в будь-якому проектному колективі підбір кадрів і підвищення їх кваліфікації, збагачення інформаційних банків є стратегічною гарантією забезпечення якості створюваного обладнання і передусім його надійності.

Основою для прогнозування надійності виробів в період проектування є:

- розрахунки,
- порівняння з відомими аналогами,
- експертна оцінка.

Проект розробляють за кілька стадій. Потрібний рівень надійності вибирають уже на першій стадії розроблення технічного завдання (ТЗ), виходячи з вимог до виробу в експлуатації і технічних можливостей виробника виробів.

На стадії розроблення ТЗ орієнтуються на показники надійності відомих аналогів, віддаючи перевагу найбільш вдалим. У подальших розробках вибраний рівень надійності стає показником, якого треба досягти або перевищити.

На стадії створення ескізного проекту проводять перші інженерні розрахунки, у тому числі динамічні та на міцність. Від якості цих розрахунків значною мірою залежить надійність виробів. Паралельно з'являється можливість аналізувати структурні схеми надійності й виконувати попередні розрахунки її показників. Це дає змогу обґрунтовувати вибір надійних комплектуючих елементів, перевірених вузлів і конструкцій, які запозичуються з інших виробів.

Розрахунки для прогнозування надійності виробів ґрунтуються на використанні відомих показників надійності елементів. Ці показники є переважно середньостатистичними і не враховують конкретних умов функціонування елементів. Розрахунки показників надійності елементів, які доводять до порівняння за окремими критеріями розрахункових параметрів y з їх граничними величинами, дають точніші результати. Параметр y завжди можна подати функцією, яку в загальному вигляді можна зобразити рівнянням

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де x_1, x_2, \dots, x_n — випадкові чинники.

Граничні значення параметрів можна визначати за таким самим рівнянням, або вибирати за нормативами чи довідниковими даними. Іноді їх устанавлюють випробуваннями.

Дієздатність елемента за вибраними критеріями забезпечується, коли розрахунковий параметр не перевищує його граничного значення. У класичних розрахунках використовують *коефіцієнт запасу n* по відношенню до граничного значення параметру $y_{дон}$. Умови розрахунків вибирають залежно від напрямку зміни параметрів, від яких погіршуються умови роботи елемента:

$$y \leq y_{дон}n; \quad \text{або} \quad y \geq y_{дон}n .$$

Розрахунок виконують для найнесприятливіших умов, тому дійсне значення коефіцієнта запасу n залишається невідомим.

У розрахунках, що ґрунтуються на визначенні ймовірності подій, y і $y_{дон}$ розглядають як випадкові величини, а мірою надійності є ймовірність безвідмовної роботи елемента за заданим критерієм.

За ескізним проектом виготовляють експериментальні зразки виробів для випробувань або пробної експлуатації, де навантаження та інші експлуатаційні чинники, що впливають на надійність, можна перевірити.

Випробування або пробна експлуатація експериментальних зразків дають перші статистичні дані для наближеної оцінки показників надійності. На цій основі коригують і розрахунки і вдосконалюють конструкцію виробу на стадії розроблення технічного проекту.

За результатами випробувань дослідних зразків і установчої серії виробів, виготовлених за **технічним проектом**, уточнюють кількісні та якісні вимоги до надійності, формулюють вимоги до періодичності й обсягу випробувань на надійність при серійному виробництві, розробляють систему технічного обслуговування і ремонту для підтримування надійності в процесі експлуатації. Таким чином створюють **робочий проект виробу** і передають на виробництво.

Удосконалювати проект можна також під час серійного виробництва технічних об'єктів.

Процес проектування виробів об'єднує чотири стадії:

- технічне завдання (ТЗ) на проектування,
- ескізний проект,
- технічний проект ,
- робочий проект.

Багато технічних об'єктів проходить не всі з названих стадій проектування, що обмежує можливості в оцінюванні їх надійності в період розроблення. Це стосується здебільшого великогабаритного потужного обладнання, яке експлуатується з перших зразків. Для визначення показників надійності такого обладнання використовують тільки *підконтрольну експлуатацію*, яка також не завжди реалізується. Тому надійність цих виробів при проектуванні забезпечується переважно за рахунок якості проектних робіт і зв'язків проектувальників з виробничниками і експлуатаційниками.

Під час кожної стадії проектування виконують конкретні конструктивні заходи (прийоми) щодо забезпечення надійності виробів. Вирішальне значення для забезпечення надійності має правильний вибір принципу дії обладнання з урахуванням усіх фізичних та хімічних явищ, що є основою технологічних процесів за участю цього обладнання. Заміна механічних процесів на процеси іншого принципу дії (пневматика, магнетизм, гідравлічні тощо) може сприяти підвищенню показників надійності на порядок.

Окрім розрахунків на міцність, стійкість і спрацювання, при проектуванні виробів обґрунтовується вибір різних виконавчих систем, раціонально підбираються матеріали деталей з урахуванням умов їхньої роботи: агресивності складу і температури середовища, динамічних навантажень, наявності збудників вібрацій тощо.

До теплоенергетичного обладнання ставляться специфічні вимоги, які потрібно враховувати при проектуванні, адже важкі умови роботи спричинюють його підвищене спрацювання і корозійне руйнування. Лімітуючими (з погляду надійності) здебільшого є вузли тертя і деталі, поверхні яких контактують з

технологічними середовищами. Проблеми надійності цих деталей і вузлів розв'язуються за рахунок обґрунтованого вибору матеріалів і захисних покриттів. Використовують також конструктивний захист деталей від середовищ. Для цього призначені сальники, захисні щити, ізолятори, відводи для середовищ та інші засоби.

Надійніше працюють вузли тертя з ізольованими, автономними системами змащування. Затрати, спричинені подібним ускладненням конструкції виробів, з надлишком компенсуються під час їх експлуатації.

Для зниження навантаженості деталей і вузлів удаються до розподілення навантажень. Відчутного пошкодження теплоенергетичному обладнанню корозія. Основним конструктивним заходом для боротьби з нею є відповідний вибір матеріалів або покриттів. Окрім традиційних металевих гальванічних (оксидних, нікелевих, хромових, цинкових) і неметалевих (полімерних, емалевих) покриттів впроваджуються відносно нові покриття різного складу і технології їх нанесення: термодифузійні й газоплазменні, нанесені в жевріючому електророзряді, електроіскрові та ін. Одним із ефективних засобів захисту обладнання від корозії є установлення протекторів з активнішого металу, які змінюють електродний потенціал металевих деталей.

До конструктивних заходів щодо забезпечення надійності виробів належить також спрощення конструкцій для забезпечення легкого демонтажу і монтажу вузлів при виявленні елементів, що відмовили, і під час виконання ремонтних операцій. Перспективними вважають конструкції у вигляді агрегатів, які у разі відмови повністю можна було б замінити новими або відремонтованими. Агрегати ж, що відмовили, можуть ремонтуватись автономно і не обмежувати використання технічних об'єктів.

Наведені конструктивні заходи узагальнюють таким чином: підпорядкування конструкції виробу існуючій системі обслуговування і ремонту обладнання в галузі, що використовує це обладнання. При проектуванні

задається також система контролю і необхідних вимірювань виробів під час виробництва з тим, щоб гарантувати їх якість.

5.7. Період виробництва

У сфері виробництва виробів виокремлюють *стратегічні й тактичні* засоби забезпечення їх надійності.

До стратегічних належать такі засоби забезпечення надійності:

- підтримка належного науково-технічного рівня виробництва,
- високий рівень технологічної дисципліни,
- підготовка й підвищення кваліфікації інженерно-технічних і виробничих кадрів,
- підвищення рівня інформованості,
- забезпечення прямих і зворотних зв'язків з проектувальниками та експлуатаційниками,
- організація і культура виробництва.

Щоб забезпечити надійність своєї продукції, на машинобудівних підприємствах здійснюють вхідний контроль комплектуючих на відповідність технічним вимогам. Для цього призначена також система контролю власного виробництва, приймання і випробування готових виробів.

До тактичних засобів підвищення надійності належать:

- зміцнення і поліпшення матеріалу деталей методами термічної, хімікотермічної, термодифузійної та інших видів обробки;
- зняття внутрішньої напруженості кованих, литих, термооброблених деталей за рахунок відпалювання, старіння або відпускання;
- якісне виконання фінішних операцій (шліфування, хонінгування, полірування, вигладжування);
- заміна різання пластичною деформацією при формуванні деталей (наприклад, накатування різьби, галтелей і переходів на валах та інших ступінчастих важконавантажених деталях).

Пластична деформація сприяє зміцненню деталей або їх поверхні, оскільки в деформованому металі зникають дефекти, що виникли під час попередніх процесів обробки, а при деформації волокна структури набувають форму готових деталей (наприклад, при куванні заготовок колінчастих валів) і надають більшої міцності.

Зміцнення деталей пластичною деформацією можна досягти, якщо внутрішню напруженість, що з'являється між деформованим шаром і основною структурою, протиставити діючому навантаженню. Несівна здатність деталей підвищується саме завдяки такому протиставленню зусиль пружної деформації діючим зовнішнім силам.

5.8. Період експлуатації

Методи експлуатації теплоенергетичного обладнання істотно впливають на їхні показники надійності й довговічності. Умови і режими експлуатації визначають спектр негативних чинників, які впливають на об'єкт (середні навантаження, швидкості, температури, агресивні середовища тощо), та інтенсивність руйнування його елементів.

Щоб створити сприятливі умови для роботи машин і обладнання, потрібно регулярно змащувати рухомі з'єднання, захищати їхні деталі від потрапляння агресивних речовин і забруднення. Особливо важливо ізолювати поверхні технічних об'єктів, у разі, якщо навколишнє середовище насичене абразивними частинками.

У сучасних складних технічних системах (літаках, двигунах, верстатах та ін.) передбачені спеціальні давачі і системи контролю, які дають змогу вимірювати основні параметри (тиск оливи, температуру, зусилля тощо) і контролювати працездатність окремих елементів і механізмів. Така постійна технічна діагностика необхідна для забезпечення раціональних умов експлуатації і підвищення надійності виробів.

Працездатність технічних об'єктів у разі відмови їхніх елементів і зниження характеристик відновлюють у період ремонтів. Для виконання всього комплексу ремонтних робіт розробляють спеціальну систему, яка відображає специфіку й умови роботи машин і апаратів конкретного типу. Добре зарекомендувала себе система планово-попереджувальних ремонтів (ППР), яку вперше запровадили в авіації, автомобілебудуванні й під час ремонтів металорізальних верстатів. Типова система ППР мала дев'ять періодів зі структурою ремонтного циклу

I–I–II–I–I–II–I–I–III (або M–M–C–M–M–C–M–M–K),

де I(M) — малий ремонт, II(C) — середній, III(K) — капітальний.

Систему ППР широко застосовують в енергетиці. Нормативні матеріали щодо системи ППР розроблену практично в усіх галузях промисловості. Вони охоплюють статистичні дані, формули і правила встановлення обсягу ремонтних робіт і терміну міжремонтного періоду для кожного конкретного випадку. При створенні будь-якої ремонтної системи потрібно виходити з умови забезпечення високого рівня надійності й довговічності технічного об'єкта.

Міжремонтний період (T_I) є основним параметром системи ППР, який відображає специфіку конкретного обладнання, характер його навантаження й експлуатації. Міжремонтний період можна вважати оптимальним ($T_I = T_{opt}$), якщо встановлюється таке співвідношення між обсягами робіт під час періодичних ремонтів і міжремонтного обслуговування, яке забезпечує мінімальну трудомісткість ремонту для певних умов.

При збільшенні міжремонтного періоду велика кількість деталей ремонтується при міжремонтному обслуговуванні. Це зумовлює з одного боку, до повнішого використання термінів експлуатації окремих деталей, а з іншого, до збільшення обсягу збірно-розбірних робіт. Зважаючи на це, О.С. Проніков запропонував таку формулу для визначення оптимального міжремонтного періоду:

$$T_{opt} = \frac{1,8}{k} \left(\frac{\tau_k}{\tau_1} + 1 \right) \left(\beta - \sqrt{(\beta^2 - 1)T_\Phi} \right),$$

де k – кількість ремонтів у циклі ($k=6$ або $k=9$); τ_k – трудомісткість капітального ремонту; τ_l – трудомісткість малого ремонту; T_ϕ – фактичний міжремонтний період; β – коефіцієнт, що показує зростання трудомісткості ремонту деталей вузла при міжремонтному обслуговуванні за рахунок збільшення об'єму складально-розбірних робіт. Коефіцієнт β залежить від конструкції технічного об'єкта, його можна розрахувати або визначити практично.

Підвищення довговічності деталей і вузлів технічного об'єкта чи складної системи, поліпшення їх конструкцій і технології ремонту повністю сприятиме підвищенню надійності й довговічності лише за умови правильно вибраних основних параметрів системи ремонту і насамперед структури ремонтного циклу і величини міжремонтного періоду.

Контрольні запитання

1. На якій стадії створення енергетичного обладнання проводять визначальні випробування?
2. Яким чином здійснюється форсування випробувань?
3. Для чого проводять контрольні випробування?
4. У чому полягає відмінність ризик споживача і виготовлювача?
5. На чому ґрунтується прогнозування надійності енергетичного обладнання в період проектування?
6. Якими загалом є засоби підвищення надійності енергетичного обладнання?

6. СТРУКТУРНИЙ ПІДХІД ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ

6.1. Основні напрямки розвитку методів оцінки надійності

Особливістю проблеми надійності енергообладнання є її зв'язок з усіма періодами його існування – проектуванням, виготовленням та експлуатацією, починаючи з моменту формування й обґрунтування ідеї створення нового виробу і закінчуючи прийняттям рішення про його списання.

Основні заходи щодо забезпечення надійності, вжиті на стадії проектування або виготовлення машин чи апаратів, безпосередньо впливають на їхні експлуатаційні та економічні показники.

До останнього часу при створенні методів розрахунку показників надійності технічних об'єктів використовувалися переважно статистичні підходи, в яких або зовсім не відводиться, або відводиться другорядне місце врахуванню змін фізико-хімічного стану матеріалів, з яких виготовлені елементи обладнання. Ці методи ґрунтувалися на аналізі *статистичних даних*, які стосуються випробувань. За такого підходу в тіні залишаються ті зміни, які відбуваються в елементах обладнання з плином часу в результаті дії експлуатаційних чинників.

Проблема оцінки надійності пов'язана насамперед з прогнозом, оскільки констатація того чи іншого рівня надійності для машини, яка вже відпрацювала свій ресурс, має досить малу цінність. Надійність машини або апарата в умовах експлуатації потрібно визначати вже на стадії проектування.

Наука і дослідження з надійності розвиваються у двох основних напрямках.

Перший напрям, що виник у радіоелектроніці, пов'язаний з розвитком математичних методів оцінювання надійності, зі статистичним обробленням експлуатаційної інформації, з розробленням структур складних систем, які забезпечують високий рівень надійності.

Другий напрям, що виник у машинобудуванні й пов'язаний з вивченням фізики відмов (спрацювання, корозії, втоми тощо), з розробленням методів

розрахунку на спрацювання, міцність, теплостійкість, з використанням технологічних прийомів, які забезпечують потрібну надійність виробів.

Основою цього напрямку є результати дослідження природничих наук, що вивчають фізико-хімічні процеси руйнування, старіння та зміни властивостей матеріалів, з яких виготовлене обладнання та машини або які необхідні для їх функціонування.

З позицій надійності результати цих наук концентруються у сфері, яка отримала назву «фізика відмов».

Фізика відмов вивчає незворотні процеси, які призводять до втрати матеріалом деталі початкових властивостей під час експлуатації машин та обладнання. Часові залежності фізики відмов – це основа для розв’язування основних задач надійності.

Рівень надійності теплоенергетичного обладнання визначають, головним чином, на етапах проектування та виготовлення. Експлуатуючий персонал має тільки підтримувати його. Проте за раціональної організації експлуатації можна отримати вищі показники надійності, ніж проектні.

Наприклад, правильне і своєчасне проведення профілактичних заходів, своєчасне відновлення працездатності деталей з метою попередження відмов еквівалентне зниженню розрахункової інтенсивності відмов машин.

Недоліком **ймовірнісних методів** кількісного оцінювання надійності технічних пристроїв є те, що вони не пов’язані з **фізико-хімічними процесами** виникнення і природою відмов, тому мають принципові обмеження, особливо в оцінюванні надійності теплоенергетичного обладнання, які працюють за постійної зміни навантаження і характеристик технологічного середовища.

Більш точним є метод оцінювання довговічності, що враховує фізику процесів руйнування та інтенсивність експлуатаційного впливу навантажень і технологічних середовищ. Основою його є експериментальні функціональні залежності фізичних процесів руйнування.

Такий метод є структурно-ймовірнісним, оскільки, на відміну від імовірнісного, вводить до розгляду фізичну природу міцності й часові закономірності. Він ґрунтується на використанні апріорної інформації про можливі фізичні реалізації і закономірності процесу руйнування залежно від чинників навантаження і середовища.

Фізичний підхід вважають єдино можливим у тих випадках, коли не можна отримати статистичний матеріал у достатньому обсязі, або коли для цього потрібно забагато часу. Розвиток структурно-ймовірнісних методів, які враховують фізичну сутність процесів, які спричинюють деградацію і старіння виробів, є найбільш перспективним напрямом розвитку способів оцінювання надійності енергообладнання, яке працює в агресивних корозійно-активних середовищах.

Структурно-ймовірнісні методи оцінки показників надійності ґрунтуються на встановленні:

- фізичних властивостей і параметрів матеріалів та елементів, фізико-хімічних процесів зміни цих властивостей у часі,
- інтенсивності експлуатаційних чинників з урахуванням випадкового характеру їх величин і процесів, які реалізуються.

Оцінювання надійності машин, що ґрунтується на даних про фізичні властивості матеріалів, характеристики елементів і діючих чинників передбачає використання ймовірнісних, статистичних методів, оскільки ці властивості й характеристики, як правило, є випадковими функціями часу або випадковими величинами.

Це пов'язано з двома основними причинами. По-перше, початкові властивості матеріалів, геометричні й експлуатаційні параметри деталей мають розсіювання, адже вони є продуктом якогось технологічного процесу, який може відбуватися лише з певною точністю і стабільністю. По-друге, стохастична природа процесів старіння матеріалів і деградації виробів пов'язана з широкою варіацією режимів роботи та умов експлуатації.

У результаті цього, залежності, які описують процеси старіння, є функціями випадкових аргументів – навантажень, швидкостей, температур, характеристик технологічних середовищ тощо, які випадково змінюються в технічному (експлуатаційному) діапазоні або виходять за його межі в разі відмов.

Розглядаючи процеси старіння (корозії чи спрацювання) як випадкові, часто доцільно зводити їх до досить простих закономірностей, особливо якщо вдається виокремити ту частину процесу, яка формує стохастичну природу, у вигляді випадкової величини або стаціонарної функції.

6.2. Модель формування відмов енергетичного обладнання

Закономірності старіння, які визначають ступінь пошкодження деталей машин і обладнання як функцію часу, є основою для розв'язування задач надійності. Вони дають змогу прогнозувати хід процесу старіння (деградації), оцінювати можливі шляхи його реалізації і виявляти найістотніші чинники, які впливають на інтенсивність процесу.

Типовим прикладом таких залежностей є закони втоми, спрацювання і корозії матеріалів, які на основі розкриття їхньої фізичної природи дозволяють прогнозувати інтенсивності цих процесів у часі й оцінити параметри, що впливають на хід процесу.

На вихідні параметри елементів обладнання впливають усі процеси деградації, які характеризуються такими видами їх взаємодії:

1. Процеси, які відбуваються одночасно, разом не впливають на вихідні параметри і визначають їх зміну незалежно один від одного (наприклад, поверхні тертя пошкоджуються внаслідок потрапляння абразиву і дефекту литва).

2. Процеси, які відбуваються одночасно, разом не впливають на вихідні параметри, але їх дія на них враховується сумарно (наприклад, температурна і силова деформація підсумовується, якщо процеси не супроводжуються незворотними явищами, зокрема, пластичною деформацією).

3. Процеси, які відбуваються одночасно, взаємодіють і утворюють складніший процес (найбільш характерний випадок). Типовим прикладом можуть бути процеси корозійно-механічного спрацювання металів і сплавів, коли результат є не простою сумою корозії і механічного спрацювання, а складнішим фізико-хімічним процесом, інтенсивність якого вища за суму інтенсивностей кожного з чинників.

При деяких взаємодіях реалізується провідний вид процесу, коли його особливості найбільше впливають на вихідні параметри технічного об'єкта. У цьому разі пошук закономірностей, які описують таке явище, дещо полегшується.

Для більшості процесів деградації технічних об'єктів та їх старіння характерна саме одночасна дія деформаційних, теплових, хімічних та інших процесів, які призводять до виникнення складної фізико-хімічної картини зміни початкових властивостей і стану виробів. Вихідні параметри будь-якого виробу є його основними характеристиками, а їх зміна під час експлуатації має пов'язуватися зі ступенем пошкодження окремих елементів і пояснюватися типовими процесами старіння.

Для елементів конструкцій, що працюють у контакті з корозійно-активними середовищами, основними процесами старіння є корозія і спрацювання. Вони і визначають момент втрати обладнанням працездатності. Таким чином, знання часових залежностей, що описують процес пошкодження і використання показників, оцінюють ступінь пошкодження, матеріалу виробу, є необхідною умовою для забезпечення задач прогнозування надійності.

Найперспективнішими є аналітичні залежності, які ґрунтуються на фізиці явищ і оцінюють вплив основних чинників на швидкість процесу старіння.

Відмови елементів енергетичного обладнання поділяють на:

- відмови через руйнування елементів та відмови внаслідок порушення властивостей функціонування (поломки, недопустимі деформації, спрацювання і корозія елементів системи тощо);

- порушення регулювання, залипання, забивання робочих органів брудом, послаблення кріплень під дією вібрації та ін.

У енергетичному обладнанні, що працює в контакт з корозійно-активними середовищами, процес зміни початкових параметрів характеризується великою кількістю взаємозв'язків і виникненням різних за природою процесів старіння. Це впливає передусім на показники надійності та ступінь віддаленості технічного об'єкта від граничного стану (рис. 6.1).

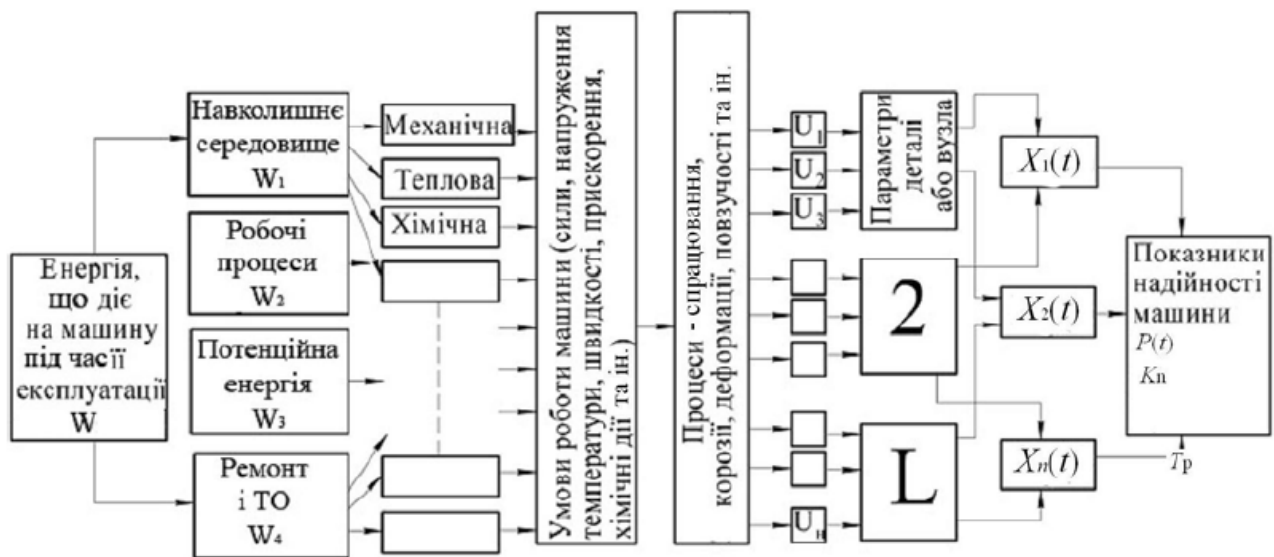


Рис. 6.1. Схема формування показників надійності машини.

Проявляючись у вигляді механічної, теплової, хімічної, енергія визначає умови роботи об'єкта і його елементів: навантаження, напруження, температуру, швидкості і прискорення, хімічні та дії, які сприяють виникненню процесів спрацювання, корозії, деформації тощо.

Пошкодження окремих деталей згідно з відповідними моделями відмов формують показники надійності всієї машини. Їхня фізична інтерпретація є складним процесом, тому багато дослідників спираються на стохастичні залежності й вивчають поведінку складної системи лише методами теорії ймовірностей і математичної статистики. Однак такий підхід є одностороннім. Тільки зважаючи на функціональні зв'язки з урахуванням стохастичної природи

процесів і явищ, можна оцінювати плин змін у технічній системі, прогнозувати її надійність, моделювати ці зміни за різних умов експлуатації.

Машина не може працювати і змінювати свій стан за строго детермінованими законами, оскільки швидкість процесів старіння її елементів є випадковою величиною. Не можна поставити задачу про розкриття всіх зв'язків технічних систем, адже це навіть теоретично неможливо. Потрібно виявити ті основні зв'язки і залежності, які з достатньою достовірністю описують процеси деградації об'єкта, його спрацювання і старіння.

Розкриття цих взаємозв'язків спрощується наступним чином:

- при аналізі вибирають лише ті зв'язки, які відіграють основну роль у формуванні показників надійності;
- вхідні параметри є взаємонезалежними;
- не всі процеси проявляються одночасно;
- наслідки відмови виробу з різних причин нерівнозначні;
- наявні обмежувальні параметри, які є предметом інженерного аналізу при розрахунках параметричної надійності виробу.

6.3. Підвищення надійності обладнання на стадії проектування

Один з основних напрямів підвищення надійності машин – створення оптимальної конструкції машин.

З позиції надійності *оптимальною є така конструкція машини* та її елементів, коли за найменших затрат коштів досягається задана довговічність роботи окремих вузлів, механізмів і машини в цілому з забезпеченням показників безвідмовності та довговічності і регламентованих затратах на технічне обслуговування та ремонт.

В основу вибору раціональної конструкції має бути покладено:

- використання методів оптимізації руху механізмів;
- обґрунтування можливих пікових навантажень;
- прогнозування змін вихідних параметрів;

- використання методів оцінки показників надійності машин в цілому, складальних одиниць і складових частин;
- можливість скорочення ремонтних затрат;
- прогнозування обсягів виробництва запасних частин.

Раціональний вибір конструкції повинен максимально зменшити вплив зношування, втоми металу, пластичної деформації, корозії на вихідні параметри виробу при одночасному зменшенні його собівартості. Таким чином можна створювати машину з регламентованими показниками надійності. Водночас конструкція має бути раціональною за її ремонтпридатністю та регламентацією решти властивостей і показників надійності.

Конструктивні заходи щодо підвищення надійності:

- забезпечення достатньої жорсткості базових деталей (уникнення пластичної деформацій, або критично небезпечного рівня деформації);
- зниження концентрації напружень при виборі форми та розмірів деталей;
- поліпшення конструкції та матеріалів ущільнювальних пристроїв (сальників);
- вибір довговічних матеріалів деталей і раціонального поєднання їх у парах тертя;
- створення ефективних фільтрів для очищення повітря, палива, оливи, мастила та робочої рідини машин з гідроприводом;
- створення машин з регламентованими показниками надійності.

Якщо порівняти дві однакові машини, для першої з яких відомі основні параметри та показники, що визначають її надійність, а для другої цих даних немає, то можливості з ефективного використання цих машин будуть істотно відрізнятися.

Для першої машини можна з найбільшим наближенням до справжніх потреб запланувати обсяги ремонтних робіт і вибрати міжремонтний період, а також розрахувати номенклатуру та обсяг запасних частин. Крім того, для цієї машини можна передбачити заходи, що не допускають появи непередбаченого виходу з

ладу окремих елементів і вузлів, особливо тих, порушення в роботі яких може призвести до важких наслідків. Отже, коли відомі характеристики безвідмовності та довговічності машини та її елементів, можна розробити найефективніші заходи щодо підвищення її надійності в умовах експлуатації.

Усього цього не можна зробити для іншої машини, де не відомі характеристики надійності і тому параметри ремонтної системи та заходи щодо підвищення надійності не можна оптимізувати. Використати потенціальні можливості даної машини є проблематичним, оскільки є небезпека непрогнозованої відмови відповідальних вузлів і елементів.

Отже, можливість прогнозування надійності, нормування швидкостей процесів старіння є важливим ще на стадії проектування машин. На цій стадії створюються умови технічного обслуговування, контролю і діагностики, методики визначення термінів поточних і капітальних ремонтів, умов зберігання та транспортування тощо.

Вимоги до конструкції щодо ремонтпридатності машин полягають:

- у забезпеченні інструкціями про операції з технічного обслуговування машини;
- у доступності до місць регулювання та змащування;
- у застосуванні одноразових мастил, обмеженні кількості місць змащення та мастильних матеріалів;
- у легкозамінності недовговічних елементів та елементів під час ТО.

Вимоги до конструкції щодо можливості проведення технічного діагностування полягають:

- у забезпеченні проведення операцій діагностування за допомогою діагностичних засобів, що випускають серійно;
- у розробці оціночних параметрів технічного стану машин;
- у розробці структури та періодичності діагностування елементів, що визначають працездатність машини.

Вимоги до конструкції щодо усунення відмов в процесі поточних і капітальних ремонтів полягають:

- у забезпеченні доступності до місць можливого виникнення відмов і мінімуму затрат часу на усунення їх, заміну недовговічних елементів;
- у забезпеченні вільного доступу до різних кріпильних і фіксуєчих пристроїв та можливостей зручного і швидкого розбирання (складання) машини на агрегати та агрегатів на деталі;
- у забезпеченні можливості кріплення агрегатів до стендів при розбиранні (складанні) та випробуванні їх;
- у виключенні можливості неправильного складання з'єднувальних пристроїв (силових передач, гідравлічних елементів, паливо-подачі, електропроводки та ін.).

Вимоги до конструкції щодо зберігання та транспортування полягають:

- у розробці переліку операцій, необхідних для підготовки до зберігання та транспортування;
- у забезпеченні мінімуму затрат праці і енергії при зберіганні;
- у створенні умов, що запобігають корозії різьбових з'єднань і деталей та накопичення на них вологи, пилу, робочих відходів тощо.

6.4. Роль технології машинобудування в забезпеченні надійності

Підвищення надійності машин досягають у тісному контакті конструкторів з технологіями. Технологи повинні втілити задуми конструкторів, забезпечивши при цьому мінімальну матеріало-, трудо- і енергомісткість виробів.

Технологічні рішення повинні забезпечити:

- потрібну точність виготовлення деталей;
- досягнення заданих геометричних характеристик якості поверхонь, особливо контактних;

- вибір раціонального виду обробки;
- зміцнення контактуючих поверхонь.

Забезпечення потрібної точності виготовлення елементів обладнання залежить від рівня технології, що використовується, точності засобів контролю, кваліфікації робітників і поопераційного контролю якості технологічних операцій. З підвищенням точності виготовлення деталей зменшуються початкові зазори в рухомих з'єднаннях і, як наслідок, час припрацювання тертьових спряжень, забезпечуються посадки в нерухомих і рухомих з'єднаннях, що значно підвищує довговічність машин та їхній доремонтний ресурс.

Забезпечення заданих геометричних характеристик якості поверхонь суттєво впливає на динамічну міцність деталей машин. Чим менша шорсткість, тим більша опірність поверхонь до корозійних зношувань.

Відхилення форми певним чином впливає на величину зазору (натягу) спряження, умови контактування, змащування і, отже, значною мірою визначає експлуатаційну надійність вузлів та машини в цілому.

Вибір раціонального виду обробки потребує науково-виробничої перевірки, оскільки збільшення швидкості обробки може призвести до зменшення точності внаслідок вібрацій.

Зміцнення контактуючих поверхонь деталей та пар тертя може бути вирішено за рахунок використання технологій зміцнення матеріалів і/або зносостійких покриттів. Наприклад, напиленням в глибокому вакуумі покриття завтовшки 5...15 мкм з зносостійких і жаростійких сполук TiN, WC, C₂N. Довговічність таких деталей підвищується в 5...15 разів. Перспективними є такі види зміцнення поверхонь, як плазмове напилення порошків, термообробка лазером тощо.

6.5. Вплив експлуатаційних факторів на надійність енергетичного обладнання

Значну частину обладнання електричних станцій складає обертове обладнання, до якого можна віднести турбінне, насосне, тягодуттєве та компресорне обладнання. Наявність підвищеної вібрації у обертового обладнання є порушенням його справного стану. Вібраційні процеси поділяються на стаціонарні (постійні у часі) і нестаціонарні (перемінні часі). Стаціонарні процеси можуть бути періодичними, гармонічними та полігармонічними, а нестаціонарні - перехідними і випадковими.

Результатом періодичних процесів навантаження (механічного чи термічного) є втома металу. Як свідчить практика, 50–80 % поломок машин і конструкцій пов'язані із втомою матеріалу.

Таким чином, основними факторами, які суттєво впливають на надійність енергетичного обладнання є знакозмінне (вібраційне) навантаження і перемінне термічне навантаження. В результаті цих навантажень відбувається поступове накопичення пошкодження металу.

Втома матеріалу – це процес поступового накопичення ушкоджень під дією перемінних (циклічних) напружень через накопичення пластичних деформацій (90% довговічності) та утворення й розвиток тріщин (10% довговічності), що призводить до руйнування матеріалу. Такий вид руйнування називають **втомним руйнуванням**.

У 1880-х роках видатний німецький механік Й. Баушінгер досліджував пружні властивості матеріалів при повторно-змінному навантаженні та довів відмінність процесів деформування при статичному і циклічному навантаженнях. Він виявив, що діаграма пружно-пластичного деформування матеріалу в координатах «напруження–деформація» має форму петлі гістерезису, ширина якої дорівнює удвоєній пластичній деформації (рис. 6.2).

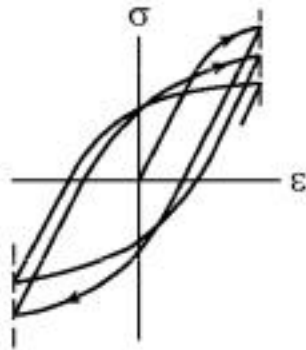


Рис. 6.2. Циклічне навантаження зразка при втомних випробуваннях.

Термін «втома» застосовується для визначення виду руйнування у вигляді раптового поділу деталі чи елемента машини на дві або більше частини в результаті дії протягом деякого часу циклічних навантажень або. Руйнування відбувається шляхом розсіяного по об'єму матеріалу пошкодження у вигляді мікропластичного деформування окремих зерен металу, зародження мікропор (розсіяне втомне пошкодження), а на більш пізньому етапі – у вигляді зародження і поширення тріщини (локальне пошкодження). Після досягнення тріщиною деякого критичного значення вона стає нестійкою й швидко збільшується, руйнуючи елемент конструкції.

Кількість циклів навантажування, при якому настає руйнування, залежить від рівня діючого напруження. Зі збільшенням змінних напружень зменшується кількість циклів, необхідних для зародження та розвитку тріщини. Навантаження і деформації, при яких зазвичай відбувається втомне руйнування, є набагато нижчими від тих, які призводять до руйнування при статичному навантаженні.

Якщо кількість циклів навантаження до руйнування перевищує 10 000 циклів, явище називають *багатоцикловою втомою*. Коли ж кількість циклів навантаження до руйнування менше ніж 10 000 циклів, явище називають *малоцикловою втомою*.

Поділ втоми металів на багатоциклову і малоциклову є умовною, оскільки природа втомного руйнування в обох випадках однакова. Принципово

відрізняються лише методики дослідження: якщо при дослідженні багатоциклової втоми використовують високочастотні резонансні коливання, то при дослідженні малоциклової втоми – низькочастотне силове навантаження (рис. 6.3).

Коли циклічні навантаження і деформації виникають в результаті дії циклічно змінного температурного поля (термоциклювання), явище називають *термічною втомою*.

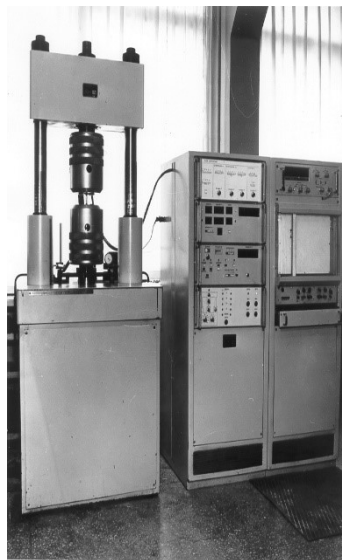


Рис. 6.3. Установка для дослідження малоциклової втоми металів.

Властивість матеріалу працювати в умовах циклічних навантажень характеризується *границею витривалості* (σ_r) – максимальним за абсолютним значенням напруженням циклу, за якого ще не відбувається руйнування від втоми протягом заданої кількості циклів навантажування, котру називають базою випробувань (рис. 6.4).

Значення границі витривалості є меншими від границі міцності і границі текучості матеріалу.

Інтенсивність розвитку втомного пошкодження залежить від структури і дефектів матеріалу, технології виготовлення і обробки, стану поверхні, середовища і температури випробувань, концентрації напружень, розмірів зразка, режиму прикладання навантаження тощо. Ці особливості викликають

значні складнощі при проектуванні машин і конструкцій у зв'язку з необхідністю уникнути втомного руйнування.

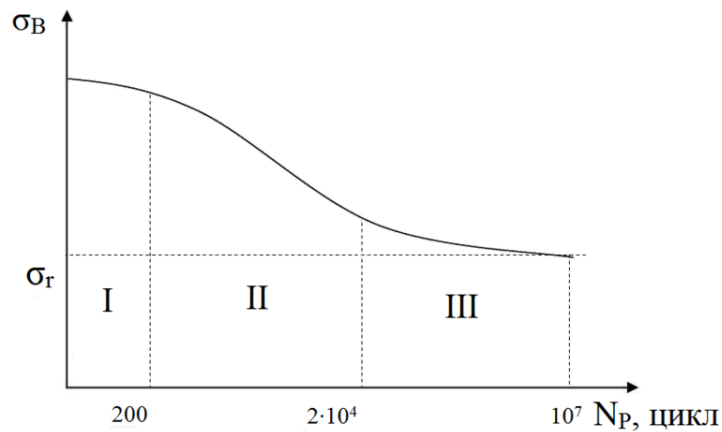


Рис. 6.4. Крива втоми для сталі.

Здатність матеріалу протистояти руйнуванню при напруженнях, перемінних у часі, називається **витривалістю**.

Під **циклічною довговічністю** розуміють кількість циклів напружень чи деформації, витриманих об'єктом, що навантажується, до досягнення граничного стану, тобто утворення тріщини втоми визначеної довжини або повного руйнування (рис. 6.5).



Рис. 6.5. Тріщина втоми у лопатці турбіни.

Випробування на втому виконують за дії циклічного навантаження об'єкта для визначення характеристик опору втомі. При випробуванні на втому, визначають границю витривалості. Для визначення границі витривалості будують криві втоми.

Таким чином, зменшення вібраційного навантаження елементів конструкції енергетичного обладнання є одним з ефективних шляхів підвищення його надійності.

Контрольні запитання

1. Що досліджує фізика відмов?
2. На чому ґрунтуються структурно-ймовірнісні методи оцінки показників надійності?
3. Які чинники враховують у моделях формування відмов енергетичного обладнання?
4. Як формується надійність обладнання на стадії проектування?
5. Які чинники впливають на надійність обладнання на стадії виготовленні?
6. Як експлуатаційні чинники впливають на надійність енергетичного обладнання?

7. ВІДМОВИ І ПОШКОДЖЕННЯ В РОБОТІ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ

7.1. Класифікація і ймовірність відмов енергообладнання

Відмови енергообладнання мають різну природу в залежності від умов експлуатації і різний ступінь небезпечності за наслідками.

Класифікація відмов енергообладнання:

- через недоліки конструкції і низьку якість виготовлення;
- через помилки при експлуатації;
- через низьку якість монтажу;
- через неякісний ремонт.

Недоліки конструкції обумовлені недосконалістю конструкторської та нормативно-технічної документації, методами розрахунку та математичного моделювання, помилками в розрахунках. Якість виготовлення виявляються після 25...30 тис. годин експлуатації.

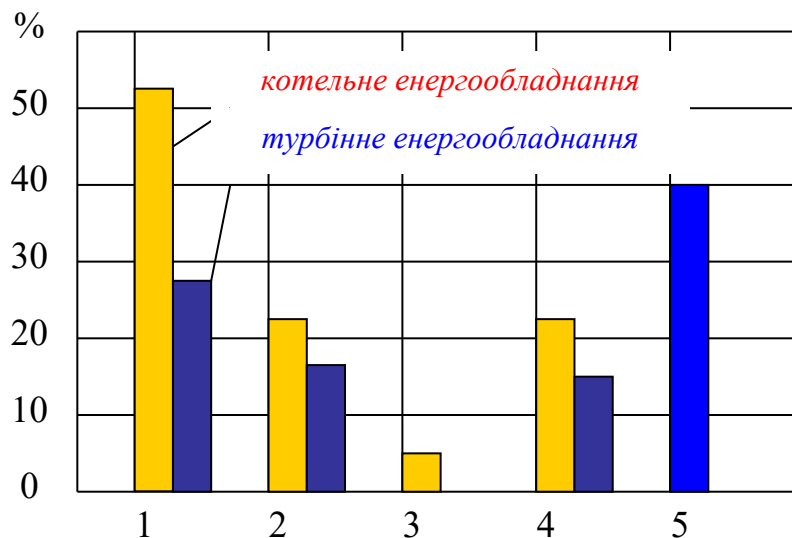


Рис. 7.1. Розподіл відмов на енергоблоках ТЕС: 1 - помилка експлуатації; 2 - неякісний ремонт; 3 - низька якість монтажу; 4 - недоліки конструкції і низька якість виготовлення; 5 - нез'ясовані причини.

Відмови через помилки експлуатації відбуваються внаслідок невідповідності умов роботи енергообладнання проектним режимам, порушення виробничих інструкцій, випадкових помилок вахтового персоналу (рис. 7.1).

Експлуатація котлів супроводжується складними фізичними і хімічними процесами в пароводяному тракті, в газо-повітряному тракті, в металі, з якого виготовлені елементи енергообладнання.

Показники надійності котлів значною мірою залежать від:

- процесів горіння (невідповідності фактичних характеристик вугілля нормативним призводить до відхилення від заданих обсягів продуктів згоряння і температури на виході топки і як наслідок – до порушення роботи конвективної частини котла, збільшення золотого зношування),

- теплообміну (низька якість води і пари приводить до різкого збільшення відкладень, підвищення температури металу труб і їх прогоряння),

- корозії,

- утворення відкладень на поверхнях нагрівання,

- зміни властивостей і характеристик металу з часом,

- порушення технології виготовлення (порушення процесу гнуття, неякісне лиття і термообробка деталей з жароміцних сталей, дефекти зварювання - непровари).

Характерними відмовами через недоліки проектування на котлах є великі теплові нерівномірності на поверхнях нагріву, прискорене їх золоте зношування (табл. 7.1). Інтенсивність відмов енергоустаткування котлів також суттєво відрізняється (табл. 7.2).

Труби екранів при експлуатації піддаються дії променевої енергії, корозійно-активного середовища продуктів згоряння палива, що при малій швидкості циркуляції і порушеннях водяного режиму призводить до їх пошкодженням та відмов у роботі котлів. Якість води и пари сильно впливає на пошкоджуваність поверхонь нагріву. Помітно впливає нерівномірне поле температур по висоті газоходу, в якому розташовується пароперегрівач: теплове

навантаження у верхній і нижній частині змійовика може розрізняються на 20%, а по ширині газоходу – на 30%.

Таблиця 7.1. Частість відмов конструктивних елементів котлів.

Паропродуктивність, т/Г	Частість відмов через пошкодження, %				
	Економайзер	Випарюв. поверхні	Пароперегрівачі	Промпеперегрівачі	Інші
2500...2650	43,9	19,5	26,8	7,4	2,4
1600...1800	4,1	9,4	37,4	48,4	0,7
950...1000	11,5	22,2	48,8	12,3	5,2
640...670	24,9	16,5	43,1	12,7	6,6
480...500	31,4	23,6	37,5	-	7,3
320...420	29,0	14,0	46,5	-	10,5
120...220	32,0	20,7	40,1	-	7,2

Таблиця 7.2. Відмови котельного обладнання.

Найменування обладнання	Частість відмов, %
Поверхні нагріву	79,2
Котельно-допоміжне обладнання	3,5
Паливоподача	2,0
Арматура	4,9
Автоматика	7,4
Інші елементи котла	3,0

Пароперегрівачі пошкоджуються ще й тому, що при тривалій експлуатації при температурах, що перевищують 500°C, структура металу зазнає змін, знижується його жароміцність. Відбувається перехід легуючих елементів молібдену і хрому в карбіди. З'являються залишкові деформації і пошкодження.

На трубопроводах найбільшого пошкодження зазнають згини через корозійно-втомні процес, а також через недостатню компенсацію температурного подовження.

Основні ушкодження запірної і регулювальної арматури – це дефекти в корпусах вентилів і засувки, порушення щільності.

В порівнянні з котлами відмови в роботі турбін відбуваються значно рідше. Разом з тим фізико-хімічні процеси, що призводять до зниження рівня надійності деталей турбін, мають багато спільного з процесами на елементах котлів: зміна властивостей металу при великих напруженнях, ерозійні процеси.

Проте навіть серйозні пошкодження корпусів циліндрів, стопорних і регулювальних клапанів не призводять до відмов. Аварійні ситуації виникають при руйнуванні лопаток, несправності в системі регулювання, пошкодженнях підшипників і зумовлюються недосконалістю технології пусків, зупинок та режимів навантаження-розвантаження.

Пошкодження робочих лопаток під дією потоку вологої пари проявляється на останніх ступенях ротора низького тиску турбін. Пошкодження роторів обумовлюється недоліками виготовлення і порушенням режимів пуску і зупинки, які призводять до появи залишкового прогину. Ряд відмов можна попередити організаційно-технічними заходами. На рис. 7.2 наведено характерний розподіл відмов турбін.

Частина відмов можна попередити вчасною заміною обладнання чи його елементів. Своєчасний високоякісний ремонт з врахуванням технічної діагностики і вимог нормативно-технічної документації забезпечує надійну тривалу експлуатацію обладнання (табл. 7.3). Коефіцієнт готовності визначає ймовірність працездатного стану в довільний проміжок часу.

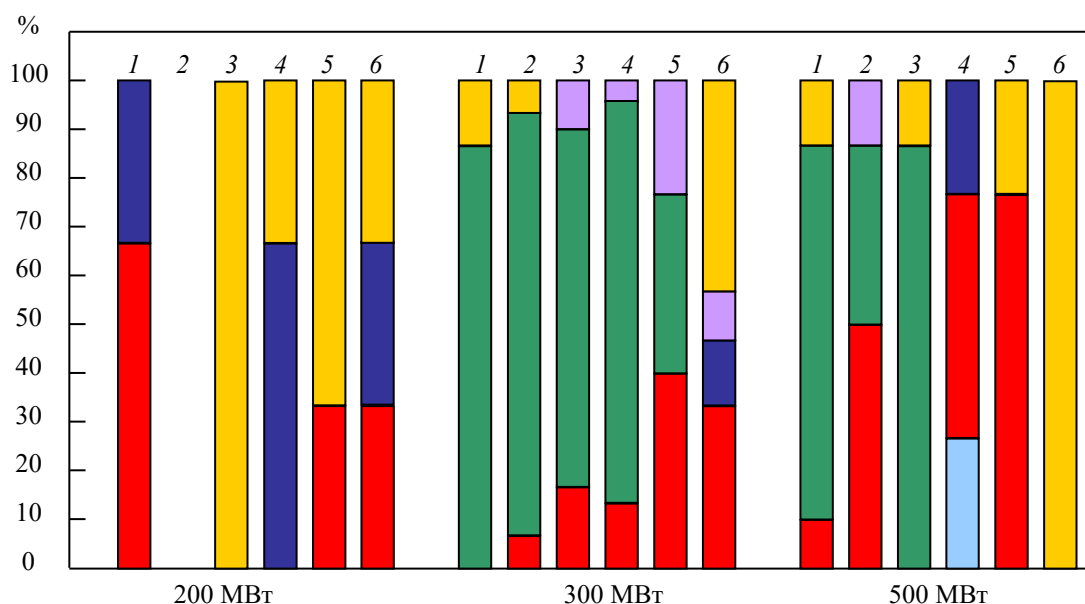


Рис. 7.2. Головні причини відмов елементів турбоустановок потужністю 200...500 МВт по роках: червоний колір – пошкодження систем паророзподілу і регулювання; синій колір – пошкодження маслосистеми; жовтий колір – відмови через вібрації; зелений колір – пошкодження арматури; фіолетовий – дефекти підшипників; блакитний колір - пошкодження проточної частини.

Таблиця 7.3. Показники надійності енергоблоків потужністю 200 МВт після напрацювання 200 тис. год. (T_v – час відновлення, ω - частота відмов).

Рік	ω , 1/рік	T_v , ч	Коефіцієнт готовності, %
1	5,68	41	97,4
2	4,71	31	98,3
3	9,4	38	96
4	6,6	37	97,3
5	4,76	95	95
6	13,9	82	88,4

Порівняння показників надійності парогазових установок (ПГУ) і паротурбінних енергоблоків потужністю 200...500 МВт наведено в табл. 7.4.

Причинами вимушених зупинок ПГУ головним чином є відмови газових турбін (табл. 7.5).

Таблиця 7.4. Порівняння показників надійності ПГУ.

Показники	ПГУ	Енергоблоки
Коефіцієнт готовності K_g , %	88,9	75...86
Коефіцієнт вимушених простоїв, %	7,5	6...7
Середній наробіток на відмову T_0 , г	500...600	600...1100

Таблиця 7.5. Відмови елементів ПГУ.

Елементи ПГУ, що спричинили відмову	Вимушені зупинки, %
Газові турбіни	65,3
Котли-утилізатори	16,5
Парові турбіни	12,7
Загальностанційне обладнання	5,4

Капітальні ремонти проводять через 3-4 роки, середні – через 2-3 роки і техобслуговування – декілька разів на рік. Не завжди ремонти і обслуговування є якісними. Наприклад, аварія на Каширській ГРЕС у 2002 р. з повним руйнуванням турбіни сталася через два тижні після капітального ремонту.

Причинами відмов після ремонтів головним чином є людський фактор (професійна підготовка, ставлення до роботи) і недостатнє технічне і технологічне забезпечення. На ТЕС повинні реєструватись всі аварії, відмови і

порушення режимів експлуатації.

Аварія – це таке порушення режиму роботи ТЕС, коли споживачі енергії недоотримують більше 50 МВт·г електроенергії або більше ніж 500 МВт·г теплоти.

Відмова першого ступеня – недоотримання електроенергії в кількості 5...50 МВт г і теплоти 50...500 МВт·г.

Відмова другого ступеня – недоотримання електроенергії в кількості, що не перебільшує 5 МВт г і теплоти 50 МВт·г.

Кожна аварія і відмова розслідується для визначення причин і наступних заходів з їхнього попередження в майбутньому. Карти відмов потрапляють в контролюючі організації для аналізу і підготовки видання збірників з огляду пошкоджень енергообладнання ТЕС.

7.2. Резервування на електростанції

Визначення ймовірності виникнення того чи іншого стану системи з резервом $P_i(\tau)$ є однією з головних задач теорії надійності стосовно енергообладнання. Поширеним способом забезпечення надійності енергоблоків є резервування відповідальних елементів станції (турбін, живильних насосів, дуттєвих машин). Для найбільш характерних схем резервування отримані залежності для розрахунку ймовірностей можливих станів.

Розрахунки ймовірності можливих станів енергообладнання базуються на таких припущеннях:

- функції розподілу напрацювання на відмову і час відновлення підпорядковується експоненціальному закону,
- інтенсивність відмов λ і відновлень μ всіх елементів є однаковими,
- показники надійності розраховуються для досить тривалого відрізка часу, що забезпечує стаціонарність потоку подій.

Розглянемо приклад простої схеми резервування (рис. 7.3). Резервний елемент не навантажений. Така схема може використовуватися в тих випадках,

коли тривалість включення в роботу резервного елемента невелика і його можна тримати у відключеному стані. Ймовірність його відмови в період знаходження в резерві приймається рівною нулю.

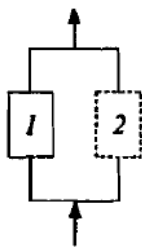


Рис. 7.3. Система з ненавантаженим резервним елементом.

В цьому випадку вірогідність знаходження системи в різних станах (в початковому і після відмови основного елемента системи) і коефіцієнт готовності визначається відповідно наступним чином

$$P_0 = \frac{2}{(1+\lambda/\mu)^2+1}; \quad P_1 = \frac{\lambda P_0}{\mu}; \quad K_r = P_0+P_1.$$

Для інших схем включення резерву можна використовувати формули, наведені в табл. 7.6.

Таблиця 7.6. Ймовірності станів для різних схем резервування.

Резерв	Схема	Ймовірності станів
Один елемент у роботі, другий – у навантаженому резерві		$P_0 = \frac{1}{(1+\lambda/\mu)^2}$ $P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}$
Два елементи у роботі, один – у ненавантаженому резерві		$P_0 = \frac{3}{2(1+\lambda/\mu)^3+1},$ $P_1 = \frac{2\lambda P_0}{\mu}, \quad P_2 = \frac{\lambda P_1}{\mu}$
Два елементи у роботі, один – у навантаженому резерві		$P_0 = \frac{3}{(1+\lambda/\mu)^3},$ $P_1 = \frac{3\lambda P_0}{\mu}, \quad P_2 = \frac{3\lambda P_1}{\mu}$

У випадку, коли резервні елементи знаходяться у ненавантаженому стані, ймовірність безвідмовної роботи за час τ системи, що складається з n робочих і m резервних елементів, визначається за формулою

$$P(\tau) = e^{-n\lambda\tau} \sum_{0 \leq y \leq m} \frac{(n\lambda\tau)^y}{y!}.$$

де y – кількість елементів, що відмовили.

Якщо m резервних елементів знаходяться в навантаженому резерві, ймовірність безвідмовної роботи за час τ системи визначається за формулою

$$P(\tau) = \sum_{0 \leq y \leq m} C_{m+n}^y [1 - P_i(\tau)]^y P_i^{m+n-y}(\tau),$$

де $C_{m+n}^y = \frac{(m+n)!}{y!(m+n-y)!}$; $P_i(\tau)$ - ймовірність безвідмовної роботи.

7.3. Резерв в енергосистемі

Однією з основних задач забезпечення надійності енергосистем є створення резерву потужності, необхідного для проведення ремонтів, технічного обслуговування і зменшення аварійного недопуску енергії при заданому коефіцієнті надійності енергопостачання.

Прихований резерв є в працюючому обладнанні, яке несе повне навантаження, і може бути довантажено практично миттєво. Гарячий резерв створюється за рахунок котлів, що знаходяться під тиском пари, і турбогенераторів на холостому ході. Холодний резерв забезпечується спеціальними резервними установками з малим часом пуску і набору навантаження (наприклад ГТУ і ГЕС).

При визначенні резерву потужності використовується наступний алгоритм: неоднорідна (реальна) енергосистема (принципова схема якої показана на рис. 7.4) приводиться до еквівалентної однорідної, що складається з однотипних енергоблоків однакової потужності з однаковими основними параметрами надійності.

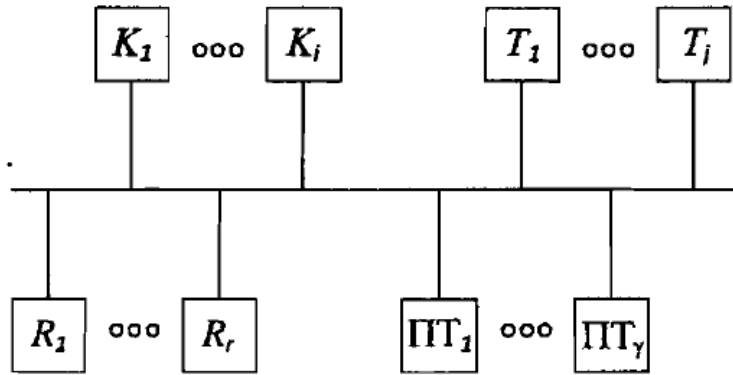


Рис. 7.4. Схема енергосистеми: К, Т, ПТ – конденсаційні і теплофікаційні енергоблоки, R – резервні енергоблоки.

Кількість еквівалентних енергоблоків (n_e), потужність (N_e) і аварійність (q_e) еквівалентного енергоблоку розраховуються за формулами

$$n_e = \frac{\sum_1^n N_n q_n (\sum_1^n N_n - \sum_1^n N_n q_n)}{\sum_1^n N_n^2 q_n (1 - q_n)}; \quad q_e = \frac{\sum_1^n N_n q_n}{\sum_1^n N_n}; \quad N_e = \frac{\sum_1^n N_n}{n_e},$$

де $n=i+j+\gamma$; N_n і q_n потужність і аварійність n -го блоку неоднорідної системи

Величина відносного резерву потужності в енергосистемі:

$$r = \frac{v \sqrt{n_e q_e} + n_e q_e + 0,5}{n_e},$$

де v - аргумент функції нормального розподілу. Для надійності енергопостачання $P_e=0,999; 0,99; 0,9 - v \approx 3,1; 2,3; 1,3$.

Величина резерву визначається за формулою

$$\sum N_r = r \sum_1^n N_n .$$

7.4. Резервування відпуску теплової енергії

Резервування відпуску теплової енергії має свої особливості. Системи теплопостачання допускають деякі короточасні відключення теплового споживача при зниженні температури усередині опалювальних приміщень. Прийнята ступінчаста градація знижених значень температури при настанні відмов.

Повна відмова системи тепlopостачання відбувається при температурі в приміщенні нижче 0°C при заморожуванні системи. Ймовірність того, що ці умови настануть, приймається рівним 0,03.

Часткова відмова системи тепlopостачання має місце при температурі в приміщенні плюс 10°C і нижче. Для неї приймається ймовірність настання несприятливих умов 0,14. Аналіз відмов у системах тепlopостачання показує, що найбільші з них пов'язані з відмовами мережевих трубопроводів великого діаметру на рівні 1м.

Основними шляхами забезпечення гнучкості і резервів системи тепlopостачання є:

- спорудження резервної бойлерної установки, що живиться гострою парою,
- установка резервних мережевих трубопроводів,
- установка резервних котелень в районі теплоспоживання, форсування потужності окремих елементів системи,
- використання електрообігрівуючих установок в якості аварійних елементів системи тепlopостачання.

Контрольні запитання

1. Яким чином класифікують причини відмов енергообладання?
2. Які основні чинники впливають на надійність турбін?
3. Які основні чинники впливають на надійність котлів?
4. Чим відрізняється аварія на ТЕС від відмови першого і другого ступеня?
5. У чому полягає алгоритм визначення резерву потужності в енергосистемі?
6. Яким чином забезпечується надійність системи тепlopостачання?

8. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ

8.1. Надійність енергоблоків на різних режимах роботи

Функціонування енергоблоку характеризується наступними режимами: стаціонарним, пуску, зупинки, резерву, ремонту, регулювання.

Відносний час перебування енергоблоків резерві визначається за формулою

$$\varphi_r = \frac{\tau_r \lambda_r}{8760},$$

де τ_r – середній час простою енергоблоків в резерві (0...10 год.); λ_r - частота режиму відключення (40...100 1/рік).

Відносний час ремонту визначається за формулою

$$\varphi_t = \frac{\tau_B \lambda_t + \tau_P \lambda_P}{8760},$$

де λ_t – частота відмов, $\lambda_t = 8760\lambda$ 1/рік; $\tau_B = 1/\mu$, ч; $\tau_P = 1/\mu$; μ – інтенсивність планових ремонтів; λ_P – частота планових ремонтів (2 1/рік); τ_P – середня тривалість планового ремонту (700...900 год.).

Таблиця 8.1. Частота і тривалість ремонтів.

Тип агрегатів	Частота планових ремонтів λ_P , 1/рік	Тривалість планового ремонту τ_P , дні
Агрегати ТЕС з поперечними зв'язками	0,25	60
Енергоблоки потужністю, МВт		
50...200		72
300	0,25	96
500...800		120
1200		144
Енергоблоки АЕС	0,25	180
Гідроагрегати		60

Відносний час пускового режиму визначається за формулою

$$\varphi_i = \frac{\tau_{\Pi}(\lambda_r + \lambda_p)}{8760},$$

де τ_{II} – середня тривалість режиму пуску (2...6 год.).

Відносний час режиму регулювання навантаження визначається за формулою

$$\varphi_j = \frac{\tau_{PH} m n_c}{8760},$$

де $n_c = 365(1 - \varphi_r - \varphi_l - \varphi_i)$ – розрахункова кількість днів; m – кількість рівнів (1...4) в добовому графіку навантаження; τ_{PH} – середня тривалість режиму регулювання (0,3...0,5 год.).

Відносний час режиму зупинки визначається за формулою

$$\varphi_\gamma = \frac{\tau_0(\lambda_r + \lambda_p)}{8760},$$

де τ_0 – середня тривалість режиму зупинки (0,3...0,5 год.).

Стаціонарний режим роботи характеризується відносним часом, який визначається з урахуванням інших режимів роботи

$$\varphi_S = 1 - \sum_{k=1}^5 \varphi_k.$$

Інтегральний коефіцієнт готовності енергоблоку визначається за формулою

$$K_\Gamma = \sum_{k=1}^5 \varphi_k K_{\Gamma k} = \varphi_r K_{\Gamma r} + \varphi_i K_{\Gamma i} + \varphi_j K_{\Gamma j} + \varphi_\gamma K_{\Gamma \gamma} + \varphi_S K_{\Gamma S},$$

де $K_{\Gamma k}$ – коефіцієнти готовності енергоблоку в режимах відповідно резерву, пуску, регулювання навантаження, зупинки, стаціонарному.

Відхилення навантаження енергоблоку від номінального призводить до зниження рівня надійності при регулюванні.

Режимна надійність котла визначається як

$$K_{\Gamma k} = \prod_1^z K_{\Gamma z}^k,$$

де для режиму пуску $z=6$, для режимів регулювання, навантаження, зупинки та стаціонарного $z=5$; $K_{\Gamma z}^k$ – коефіцієнти готовності, відповідно, парогенеруючих поверхонь (1), подачі палива (2), тягодуттьових пристроїв (3), лінії живильної води (4, деаераторів, живильних насосів), головних паропроводів транспорту пари (5), розтопкового сепаратора (6).

Режимна надійність турбіни оцінюється за формулою

$$K_{\Gamma\Gamma} = \prod_{f=1}^5 K_{\Gamma f}^k,$$

де для режиму пуску $f=5$, для режимів регулювання, навантаження, зупинки і стаціонарного $f=4$; $K_{\Gamma f}^k$ - коефіцієнти готовності турбіни (1), конденсаційного пристрою (2), що включає в себе конденсатор, конденсатні і циркуляційні насоси, блочну знесолювальну установку (3), електрогенератор (4), валоповоротний пристрій (5).

Між надійністю енергообладнання і якістю вироблюваної енергії існує чітка залежність. Так, наприклад, повна або часткова відмова енергоблоків в системі призводить до виникнення дефіциту активної потужності і, як правило, до зниження частоти струму.

Відхилення частоти від номінального значення (50 Гц) допускається в межах $\pm 0,1$ Гц, а напруги ± 5 % (для електродвигунів - до 10%).

При роботі на нормованій частоті номінальної потужності енергоблоку N відповідає витрата палива B . Зниження частоти в енергосистемі на Δf призводить до зменшення електричної потужності енергоблоку до $N_{\Delta f}$ при незмінній витраті палива. Для підтримки номінальної потужності необхідно додатково витратити паливо ΔB при форсуванні енергоблоку. Тоді при роботі енергоблоку на зниженій частоті протягом періоду часу T_f сумарна витрата палива складає

$$B_f = (B + \Delta B)T_f = BT_f \left(1 + \theta_f \frac{f_H}{B} \bar{\Delta f} \right),$$

де $\bar{\Delta f} = \frac{\Delta f_i}{f_H}$ - відносна частота, $\theta_f = \left[\frac{\partial(\Delta B)}{\partial(\Delta f)} \right]_N$ - коефіцієнт відносного приросту витрати палива енергоблоком від зменшення частоти.

В більшості випадків можна вважати, що зниження частоти на 1% призводить до зменшення навантаження на 2...2,5%. На рис. 8.1 показано вплив частоти в енергосистемі на зниження ККД енергоблоків.

Для того щоб, виключити небезпечне зниження частоти до 45 Гц, при якій порушується стійкість енергосистеми, встановлюються спеціальні автомати частотного розвантаження (АЧР). Час роботи системи з частотою 47 Гц не повинна перевищувати 20 с, а частотою 48,5 Гц - не більше 60 с.

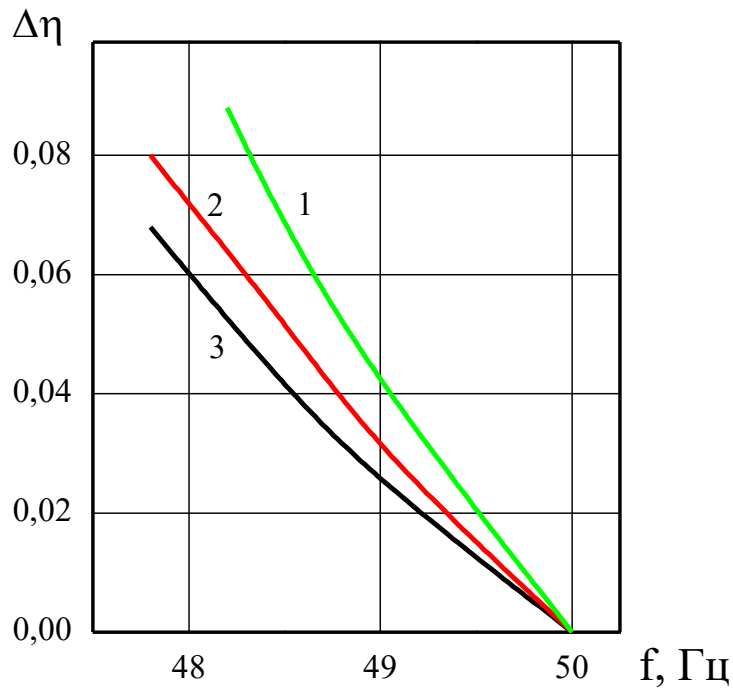


Рис. 8.1. Вплив частоти в енергосистемі на зниження ККД енергоблоків: 1 - К-800-240; 2 - К-300-240; 3 - К-100-90.

АЧР починають відключати споживачів при частоті нижче 49,5 Гц. Зниження частоти до 48...49 Гц небезпечно для самих електростанцій. При цьому різко знижуються подача і напір живильних насосів з електроприводом, тягодуттєвих пристроїв (у насосів, димососів, вентиляторів споживана потужність пропорційна частоті у третьому ступені).

Втрати від зниження частоти складаються з **втрат споживачів** (Y_{fn}) унаслідок зменшення обсягів продукції, що випускається і появи браку через розлади технологічних процесів, а також з **системних втрат** (Y_{fc}), що зумовлені зниженням ефективності і потужності електростанцій, додатковою витратою палива в системі і підвищенням втрат в мережах

$$Y_f = Y_{fn} + Y_{fc} .$$

8.2. Шляхи забезпечення надійності енергообладнання

Для забезпечення надійності енергообладнання необхідно враховувати наступні головні чинники:

- конструкцію агрегату, що визначає тепловий потік на поверхнях нагріву, ступінь нерівномірності їх обігріву, рівень температур металу,
- конструкційні матеріали, що визначають механічні і термічні напруження в металі,
- технологію виготовлення і монтажу (її вплив посилюється з зростанням одиничних потужностей енергоблоків у зв'язку зі збільшенням кількості комплектуючих елементів),
- водно-хімічний режим, що визначає інтенсивність процесів корозії металу,
- режим експлуатації, що залежать від характеру навантаження енергоблоку, якості палива, організації ремонтів.

Для енергетичного обладнання характерний тривалий термін експлуатації (30...50 років).

Гарантовані в технічній документації показники надійності закладаються в ході проектування за такими основними напрямками:

- вибір і розрахунок теплової схеми,
- застосування конструктивних рішень, що враховують якість палива і живильної води, сейсмічність району,
- резервування обладнання,
- вибір конструктивних матеріалів, що відповідають особливостям експлуатації,
- виконання комплексу розрахунків (теплових, на міцність, гідравлічних, газодинамічних) для обґрунтування рішень з вибору конструкції агрегатів,
- відпрацювання конструкторських рішень на технологічність.

Успіхи енергомашинобудування у підвищенні надійності парових котлів і турбін дозволили перейти переважно до моноблочної схеми котел-турбіна при резервуванні окремих агрегатів технологічних систем.

Розрахунковий термін служби енергообладнання виходячи з характеристик тривалої міцності металу приймають на рівні 200 тис. год. і більше. Разом з тим, оскільки обладнання (особливо котли) і трубопроводи мають високу металоємність, показники надійності повинні досягатися при мінімальному обсязі легування дорогими і дефіцитними елементами: нікелем, молібденом, вольфрамом, ніобієм.

В табл. 8.2 наводяться гранично допустимі температури стінки труб з найбільш уживаних котельних сталей. Найважливішими вихідними показниками при виконанні розрахунків на міцність є допустимі напруження сталі (табл. 8.3).

Таблиця 8.2. Гранично допустимі температури котельних сталей.

Марка сталі	$t, ^\circ\text{C}$
20	450
15ГС	450
15ХМ	550
12Х1МФ	565
15Х1М1Ф	575
12Х2МФСР	595
12Х11В2МФ	630
12Х18Н12Т	640

Таблиця 8.3. Допустимі напруження для жароміцних котельних сталей.

Температура, $^\circ\text{C}$	Допустимі напруження при тривалості роботи 200 тис. год., МПа		
	12Х1МФ	15Х1М1Ф	12Х18Н12Т
450	138	152	107
480	120	130	105
510	86	96	103
540	62	69	102
570	44	51	87
600	31	38	66
620	-	-	53
650	-	-	41

Аналіз інформації про експлуатаційну надійність енергоустановки показує, що значна частина аварійних зупинок викликається дефектами виготовлення і монтажу.

Зменшення дефектів виготовлення і монтажу досягається:

- підвищенням ступеня заводської готовності за допомогою випуску обладнання в блочному виконанні (укрупненими блоками поставляються котли і турбіни, обладнання водопідготовки),
- застосуванням сучасних способів і методів діагностики і контролю,
- застосуванням прогресивного технологічного обладнання,
- механізацією і автоматизацією процесів зварювання,
- заміною литих і зварних фасонних елементів (під тиском) на цільноштамповані конструкції,
- застосуванням мембранних поверхонь нагрівання.

Технічне обслуговування та ремонти регламентуються технічною документацією, в якій враховується діагностика і контроль технічного стану обладнання, обсяги і терміни технічного обслуговування, капітальних, середніх і поточних ремонтів, організація і проведення ремонтних робіт.

Капітальним в енергетиці вважається ремонт, при якому справність агрегату відновлюється повністю. При ***середньому ремонті*** ліквідується несправність шляхом заміни окремих елементів, що швидко зношуються або виходять з ладу. ***Поточні ремонти*** виконуються як роботи, що забезпечують безвідмовну експлуатацію обладнання до найближчого планового ремонту.

Капітальний ремонт котлів, наприклад, передбачає контроль технічного стану труб поверхонь нагріву з заміною зношених труб, їх кріплень, колекторів, відновлення змієвиків труб.

При капітальному ремонті турбіни відбувається і її розбирання і виїмка роторів. Проводиться діагностика циліндрів, лопаток, дисків з усуненням дефектів.

Середні ремонти відрізняються від капітальних меншими обсягами роботи. Поточні ремонти спрямовані на виконання ремонтних операцій, що не потребують тривалого простою обладнання.

Всі ці ремонти виконуються на з використанням спеціального обладнання через певні проміжки часу. При цьому обсяг зміст робіт повторюються, тобто ремонт обладнання має періодичний характер. Наприклад, для вугільного енергоблоку потужністю 300 МВт тривалість поточного ремонту становить 16, середнього 27, а капітального 50..70 діб.

Поточні ремонти проводиться щорічно, середні і капітальні – раз на 3-4 роки (при цьому перший середній ремонт виконується на другий рік) для кожного 12-річного циклу. Через фізичне старіння обладнання зростають обсяг і тривалість ремонтів особливо капітальних. Ремонтні цикли повторюються до тих пір, поки не виникає необхідності демонтажу через неприпустимий фізичний знос і (або) моральне старіння обладнання.

При зміні режиму роботи обладнання змінюються параметри усіх його елементів: в котлі, паропроводах, турбіні, турбогенераторі, допоміжному обладнанні.

Однак найбільш суттєві наслідки, що лімітують швидкість зміни режимів, виникають у паровій турбіні. При пуску турбіни ротор подовжується, при зупинці – скорочується. Найбільш небезпечним є розширення і скорочення ротора турбіни відносно статора. Температурні напруження накладаються на робочі напруження від тиску пари, вібрації тощо.

При високих температурах маневрені режими зумовлюють протікання періодичних процесів знакозмінного пластичного деформування. Найбільшу небезпеку маневрені режими представляють для високотемпературних зон роторів ЦВТ і ЦСТ турбін. При пусках з холодного стану гаряча пара подається на холодний ротор, де відбувається конденсація і виникає температурний удар внаслідок інтенсивного теплообміну. При пусках з гарячого стану, навпаки, на гарячий ротор подається відносно холодний пар при русі по охололих за ніч

паропроводах. Додаткова небезпека для роторів ЦВТ і ЦСТ виникає внаслідок ймовірності при різких змінах режимів роботи потрапляння всередину турбіни води і холодного пару з паропроводів. При цьому можливий залишковий прогин ротора.

Експлуатація турбіни характеризується циклами навантаження і розвантаження, пусків з різних теплових станів (після планової зупинки, скидання навантаження, аварійної зупинки і т.д.). При цьому оцінюється допустимість їхньої експлуатації у маневреному режимі роботи. При цьому використовують дані про малоциклову втому матеріалів, що зазнають циклічного механічного чи термічного навантаження. Приклад таких кривих наведено на рис. 8.2.

Головною умовою підвищення надійності маневреного обладнання є правильно обрана пускова схема, що дозволяє подавати в турбіну пару, температура якої близька до температури металу, і змінювати температуру пари у темпі забезпечення втомної міцності елементів турбіни.

В більшості випадків використовується однобайпасна пускова схема. Великі можливості дає дорожча двобайпасна схема, що дозволяє незалежно отримувати необхідну температуру пари перед ЦВТ і ЦСТ на рівні температури металу.

Важливим є також передпусковий прогрів обладнання, наприклад прогрів паропроводів промперегріву перед пуском турбіни з гарячого стану. Котел повинен забезпечувати достатньо низький рівень мінімальних навантажень, можливість отримання пари бажаної температури і тиску при низькій паропроодуктивності. Особливо важлива можливість роботи котла на ковзному тиску з забезпеченням постійної початкової температури пари перед турбіною в регульовальному діапазоні потужностей, що відвертає небезпечні зміщення ротора відносно корпусу і виникнення високих температурних напружень.

Зазвичай розрахунки теплового стану парових турбін є доволі складними, враховуючи конструктивні особливості їх елементів. Найбільш термонапружені

зони у роторах турбіни при змінних режимах роботи визначаються за допомогою граничних умов теплообміну для регламентованих графіків запуску турбоагрегата з холодного або гарячого станів і планового розвантаження та розрахунків методом скінчених елементів нестационарних теплових полів і термонапруженого стану роторів. При цьому нестационарні задачі теплопровідності та термонапруженості розв'язуються на одній і тій же скінченоелементній сітці.

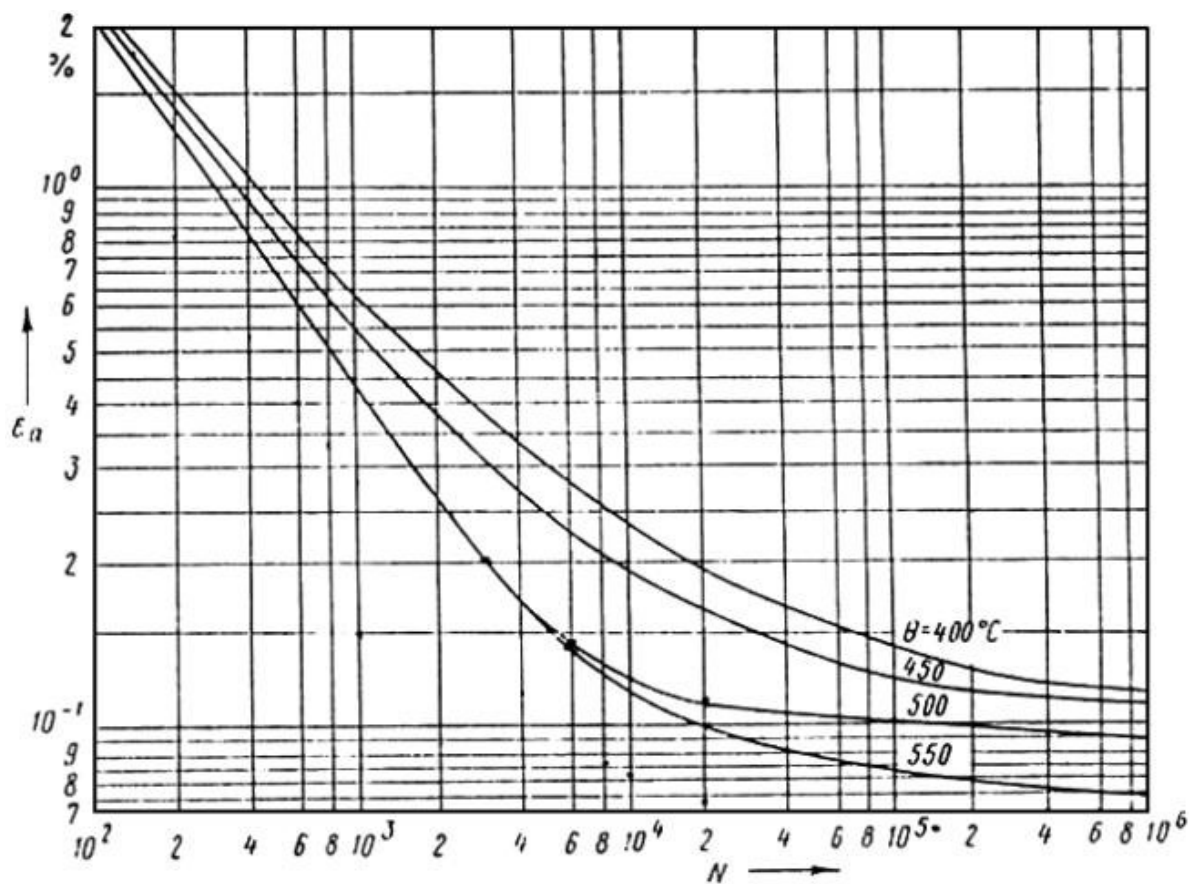


Рис. 8.2. Криві малоциклової втоми роторної сталі 25X1M1ФА при різних температурах.

При розрахунках напружено-деформованого стану роторів у випадку пуску турбоагрегата з гарячого стану розглядаються стаціонарний режим роботи, планова зупинка та остигання протягом 8 годин. Приклад такого розрахунку наведено на рис. 8.3.

Як видно, максимальна інтенсивність напружень у роторі високого тиску спостерігається при пуску турбоагрегата з гарячого стану після простою впродовж 8 годин і складає 195 МПа при набиранні потужності 400 МВт. На рис. 8.3. показані ізотерми і розподіл інтенсивності напружень для цього випадку. Максимальна інтенсивність напружень досягається на внутрішній поверхні ротора під 5-м ступенем та у придискових канавках (рис. 8.3, б).

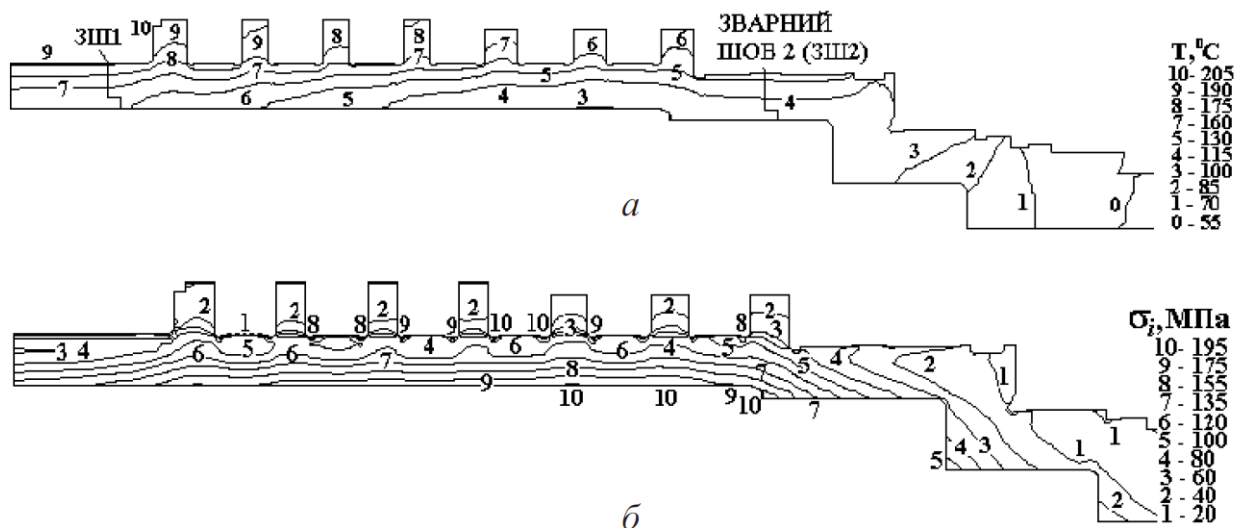


Рис. 8.3. Ізолінії температури (а) та інтенсивності напружень (б) у роторі високого тиску при запуску з гарячого стану і набиранні потужності 400 МВт.

При пуску з холодного стану і набиранні потужності 100 МВт інтенсивність напружень у роторі високого тиску досягає 170 МПа на внутрішній поверхні. У роторі середнього тиску максимальні напруження виникають при пуску турбоагрегата з холодного стану і набиранні потужності 250 МВт. При цьому спостерігається максимальний радіальний перепад температури 140°C в районі 1-го ступеня. Ізотерми і ізолінії інтенсивності напружень у меридіональному перерізі ротора в цьому випадку показано на рис. 8.4. Інтенсивність напружень сягає 380 МПа у точці В (рис. 8.4, а) на внутрішній поверхні ротора і є максимальною за час пуску-зупинки турбоагрегата. У діафрагмових галтелях має місце висока концентрація напружень, причому їх інтенсивність сягає того

ж рівня, що і на внутрішній поверхні ротора під 1-м ступенем. Максимальні стискаючі осьові напруження у цьому випадку складають 440 МПа.

При пуску турбоагрегата з холодного стану на лабіринтові ущільнення ротора низького тиску подається пара з температурою 140°C. Внаслідок конденсації пари на цій ділянці ротора відмічаються великі коефіцієнти теплообміну і перепади температури у перші 5-10 хвилин, через що максимальні стискаючі окружні напруження сягають 220 МПа.

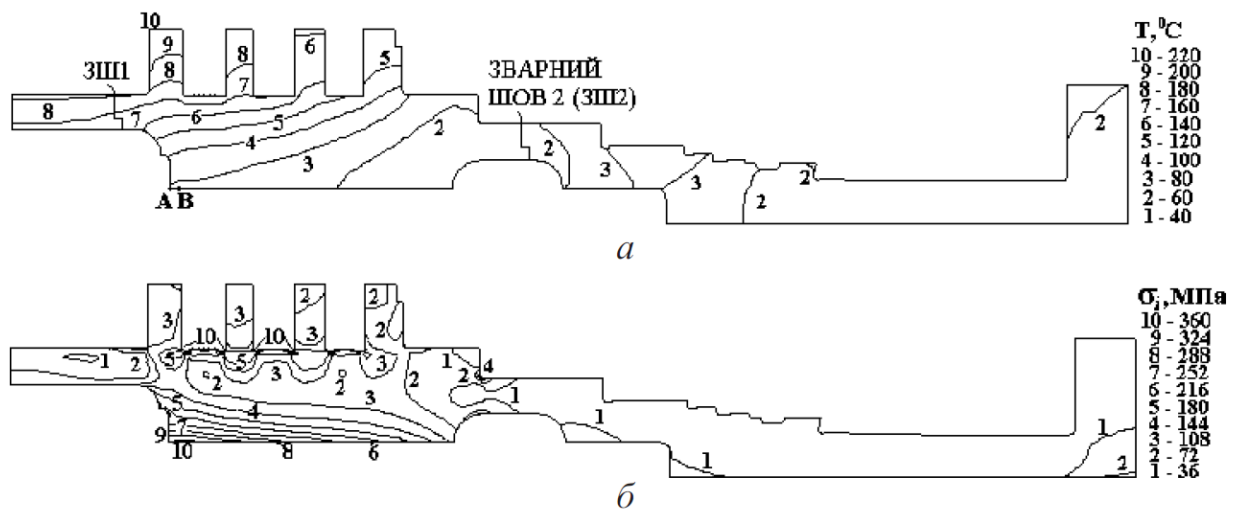


Рис. 8.4. Ізолінії температури (а) та інтенсивності напружень (б) у роторі середнього тиску при запуску з холодного стану і набиранні потужності 250 МВт.

По мірі прогрівання ротора в області лабіринтових ущільнень напруження зменшуються більше ніж у 3 рази після поштовху ротора з набранням потужності. Перепад температури в радіальному напрямку починає швидко зростати. Найбільший перепад температури і найвищий рівень напружень відмічаються при набиранні потужності 700 МВт.

Для оцінки реального стану пошкодження елементів турбіни в результаті виникнення термічних напружень їх порівнюють з граничними значеннями, що характеризують статичну міцність матеріалів, зокрема з границею текучості.

Границя текучості характеризує початок появи в матеріалі помітних пластичних деформацій, які є основним механізмом руйнування матеріалу.

Швидкість пуску турбіни з допустимими термонапруженнями елементів повинен забезпечуватись надійною роботою автоматики.

Контрольні запитання

1. Що характеризує інтегральний коефіцієнт готовності енергоблока?
2. Які фактори визначають режимну надійність котла?
3. Які фактори визначають режимну надійність турбіни?
4. Які фактори враховують для забезпечення надійності енергообладнання?
5. Яким чином експлуатаційна температура ротора впливає на його надійність?

9. НАДІЙНІСТЬ ОПЕРАТИВНИХ ЕРГАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

9.1. Загальні відомості про ергатичні системи управління

Ергатична система – структурна схема виробництва, одним з елементів якої є людина чи група людей та технічний пристрій, за допомогою якого людина здійснює свою діяльність. Основними особливостями таких систем є необхідність урахувувати соціально-психологічні аспекти.

Поряд із недоліками (присутність «людського фактора»), ергатичні системи мають ряд переваг, таких як нечітка логіка, еволюціонування, прийняття рішень у нестандартних ситуаціях.

Ергатичні системи широко поширені. Прикладом таких систем є: система управління блоком станції, система управління літаком, диспетчерська служба аеропорту, вокзалу.

Ергатичні системи знайшли своє застосування на об'єктах, де втручання оператора в роботу об'єкта є на сьогоднішній день необхідною умовою забезпечення надійної роботи даних об'єктів. Класифікація таких систем відбувається за цільовим призначенням та характером діяльності.

Виділяють такі групи систем "людина-машина":

- управляючі;
- обслуговуючі;
- навчальні;
- інформаційні.

Група управляючих систем – це та, у якій основним завданням людини чи групи людей є керування технічним пристроєм або машиною.

Група обслуговуючих систем – та, у якій задача людини полягає у контролі за станом виробництва або машинної системи, включає пошук несправностей, пошкоджень і т.п.

Група навчальних систем служить для вироблення в людини необхідних навичок, а інформаційна група забезпечує пошук, накопичення, отримання та застосування необхідної для людини інформації.

Найчастіше розглядається ергатична система управління з людиною-оператором.

Під *людиною-оператором* мається на увазі людина, основа трудової діяльності якої складає взаємодія з предметом праці, технічним пристроєм чи зовнішнім середовищем за допомогою інформаційної системи та органів управління.

Інформаційну систему складають сукупність приладів та засоби, що відображають інформацію, з якими виконує трудову діяльність людина.

Людина сприймає інформацію через органи чуття. Так, інформацією може слугувати звук працюючого двигуна, візуальна інформація про навколишню обстановку, температура, запах тощо.

Діяльністю людини-оператора називають сукупність упорядкованих дій, спрямованих на досягнення поставлених цілей та завдань. Людина у системі управління є елементом системи і складним "пристроєм".

Людина-оператор – це "пристрій" з багатоканальним прийомом, переробкою та видачею інформації. Він сприймає всю інформацію, що надходить ззовні, аналізує для відбору необхідної для роботи, переробляє її в центральній нервовій системі, маючи певні навички та знання.

Відповідно до мети функціонування системи, видає керуючі команди шляхом переміщення органів управління та разові команди. Сприймає реакцію керуючого об'єкта на команду, аналізує та реагує. Цю роботу можна порівняти з роботою ланки у замкнутому контурі управління, що здійснює зворотний зв'язок.

На людину оператора також можуть впливати чинники, які не несуть інформаційного характеру, і тому їхній вплив прагнуть звести до мінімуму спеціальними заходами. До таких чинників можна віднести вплив умов навколишнього середовища. Для нормального функціонування абсолютно всі

системи, у тому числі ергатична, потребують підтримки нормальних умов праці. Вони характеризуються: температурою, вологістю, парціальним тиском навколишнього середовища, освітленістю, вібрацією та перевантаженням.

9.2. Характеристика прийому, обробки та видачі інформації людиною оператором

Існують такі інформаційні канали людини: зорові (візуальні), акустичні (слухові), тактильні, нюхові та смакові. Сигнали, сприймані оператором називають аферентними, а видані - еферентними.

У зв'язку з тим, що під час роботи оператора найскладнішою операцією є операція стеження для ефективності роботи завжди ставиться завдання проектування ергатичної системи стеження. Інакше систему стеження називають системою з безперервним керуванням.

Під операцією стеження мають на увазі поєднання людиною-оператором двох елементів робочого процесу протягом заданого часу. Такими елементами є:

- 1) вхідна інформація – не залежить від оператора;
- 2) вихідна інформація - створюється людиною-оператором за допомогою деякого органу управління (кнопок, ручок, педалей та ін.).

Зв'язок органу управління з вихідною інформацією відбувається через машинну частину людино-машинної системи. Машинна частина буває механічною; електричною; гідравлічною, пневматичною; аеромеханічною тощо.

Завдання моделювання сенсомоторної діяльності людини полягає у формальному описі характеристик людини-оператора як ланки системи керування динамічним об'єктом. Труднощі розв'язання цього завдання обумовлені тим, що ці характеристики залежать від надзвичайно великої кількості різних факторів.

З погляду проектувальника конкретної системи управління найбільш істотна їхня залежність від характеристик сигналу, що відстежується, і від динамічних властивостей об'єкта управління. Це є наслідком, з одного боку,

обмеженості операторських можливостей людини щодо сприйняття, переробки інформації та вироблення управляючих команд, з іншого боку, - унікальних адаптаційних можливостей людини, її вміння пристосовуватися до особливості динаміки конкретного об'єкта управління.

Найбільш широко відома модель обробки інформації, запропонована Вікенсом [5] (рис. 9.1). Ця модель працює на основі системи стимул-організм-відповідь, щоб описати критичні етапи обробки інформації.

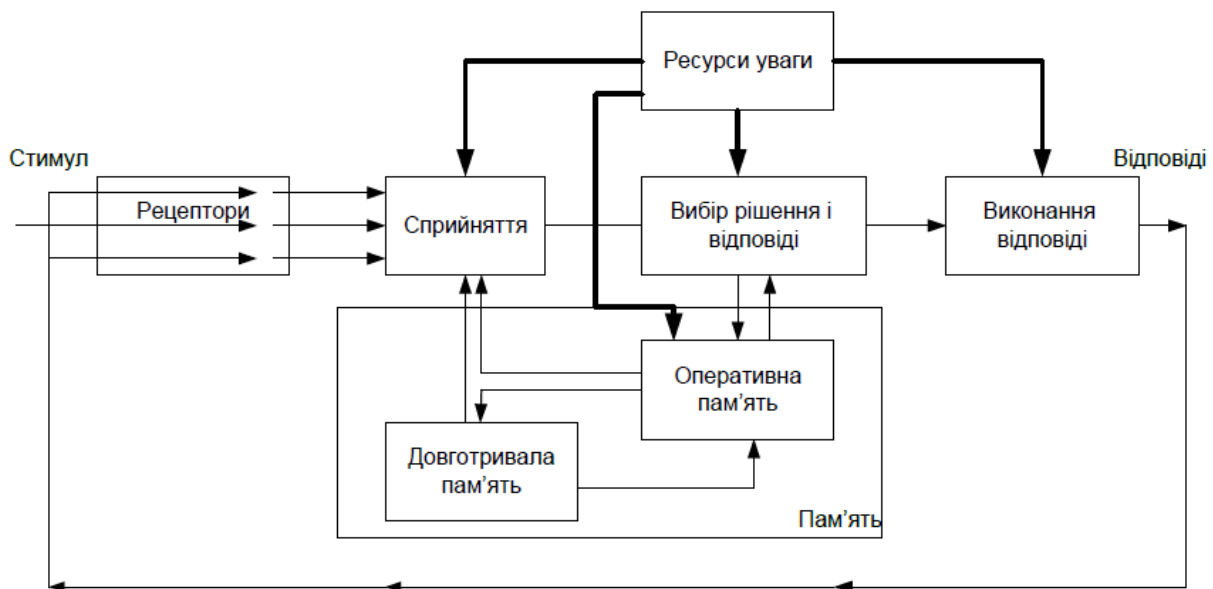


Рис. 9.1. Модель обробки інформації Вікенса.

Ця модель передбачає, що кожен етап обробки інформації виконує деякі перетворення даних і вимагає певного часу для його роботи. Сенсорна обробка інформації стосується в першу чергу обробки характеристик зорової, слухової і кінестетичних відчуттів (відчуття рухів і положення окремих частин власного тіла). Сенсорні обмеження впливають на якість і кількість інформації.

Важливою частиною моделі є обмежений резерв ресурсу уваги. Виділяють чотири типи уваги (рис. 9.2). З переходом від пасивного прийому до активного збору інформації, увага стає більш зосередженою. Обмежений резерв уваги розділений між сприйняттям, робочою пам'яттю, рішенням і вибором відповіді,

і виконання відгуку. Отже, якщо одна функція вимагає великого запасу уваги, то виконання інших функцій погіршується.

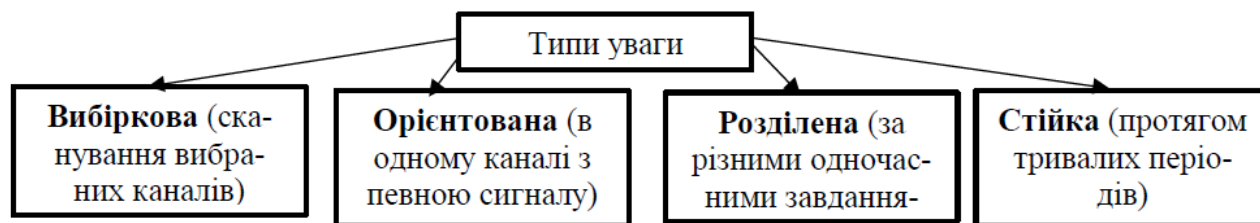


Рис. 9.2. Типи уваги оператора.

9.3. Методи оцінки людино-машинної системи

Оцінка ергатичної системи проводиться відповідно до вимог технічного завдання. Оцінюється і машинна частина, і частина участі людини, які також повинні відповідати умовам роботи людини-оператора вимогам інженерно-психологічного здоров'я.

Оцінка умов роботи включає оцінювання відповідності умов довкілля нормальним умовам, а також оцінку обсягу обробленої інформації людиною-оператором та оцінку інформаційно-керуючого поля. Інформаційно-керівне поле оцінюється за антропометричними і інформаційними оцінками.

Професія оператора на електростанціях відрізняється високою психологічно-емоційною та інтелектуальною спрямованістю і відноситься до найбільш напружених і емоційно-насичених видів професійної діяльності. Від ефективності роботи оператора і його здатності виконувати свою роботу вчасно і безпомилково залежить не тільки надійність системи управління складними процесами генерації енергії, але і енергетична безпека в цілому.

Згідно зі статистикою Eurocontrol [6] помилки операторів розподіляються в залежності від механізму їх появи наступним чином: сприйняття та пильність – 32 %, робоча пам'ять – 9 %, довготривала пам'ять – 1 %, планування та прийняття рішень – 53 %, протікання реакції – 5 %. Саме тому потрібна оптимізація роботи операторів в залежності від типу завдань які виконуються.

Аналіз особливостей роботи операторів виявив ряд закономірностей їх діяльності, що дозволяють розробити нову модель надійності, завдяки якій можливо не лише підтримувати необхідний і достатній рівень надійності та ефективності оператора, але й підвищити якість його функціонування в нормальних та екстремальних умовах (аварійні ситуації, тощо).

Кількісною оцінкою надійності роботи оператора може служити ймовірнісна оцінка успішного виконання ним операції або поставленого завдання на заданому етапі функціонування системи протягом певного інтервалу часу.

Людський чинник – основний компонент аномальних подій у системі управління повітряним рухом, і в деяких оглядах робиться припущення, що вклад людської помилки складає порядком 90% чи більше. Більшість галузей промисловості мають аналогічний рівень впливу людської помилки (наприклад, атомні електростанції – 70-90%).

Основними інтегральними показниками, що характеризують результуючі і процесуальні прояви діяльності людини-оператора, є її ефективність і якість.

Якщо показник **ефективності** трудової діяльності відображає, в основному, рівень результативних досягнень (продуктивність, швидкість і повнота досягнення і т. п.), то показник **якості** характеризує як кінцевий продукт праці (його споживчі або технологічні властивості), так і процес праці (досконалість способів виконання трудових функцій).

Поняття «надійність» виникло як одна з основних характеристик технічних засобів діяльності. Об'єктивними причинами постановки проблеми надійності постало безперервне зростання складності технічних засобів, підвищення відповідальності функцій, які вони або їх окремі елементи виконують, розширення діапазону і одночасне ускладнення умов їх експлуатації.

У найбільш загальному вигляді надійність роботи оператора зазвичай визначають як ймовірність успішного виконання завданні. У техніці під надійністю розуміють властивості об'єкта зберігати в установлених межах

значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах.

Оскільки основною умовою надійної роботи є підтримка заданого рівня безпомилковості діяльності оператора протягом певного відрізка часу, то надійність роботи людини-оператора, може бути визначена як здатність до збереження необхідних робочих якостей в умовах можливого ускладнення обстановки.

В даний час не викликає сумніву необхідність використання при визначенні надійності діяльності людини-оператора не тільки результуючих параметрів його роботи, але також показників психологічних і фізіологічних характеристик суб'єкта діяльності (рис. 9.3).

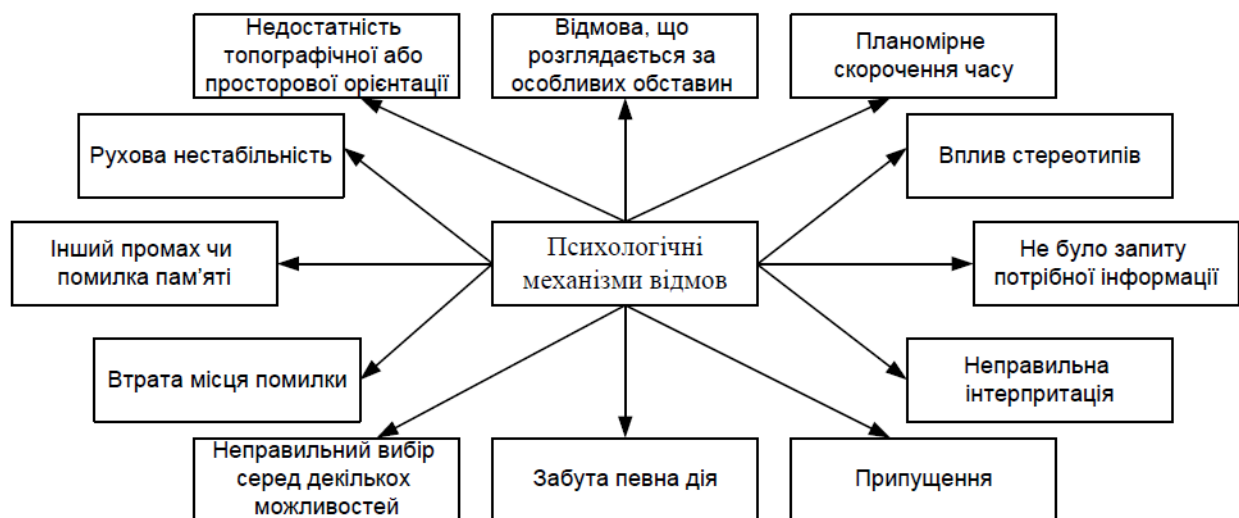


Рис. 9.3. Психологічні механізми помилки людини.

Очевидно, що знання функціональних особливостей трудових процесів, закономірностей прояву людини-оператора, механізмів регуляції її поведінки і стану в особливих умовах дозволяють не лише оцінити рівень надійності діяльності, але й обґрунтувати рекомендації щодо підтримання її на необхідному рівні.

Надійність оператора може бути визначена як кількісними так і якісними параметрами. Деякі найбільш важливі показники надійності оператора наведені

у табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Показники надійності людини-оператора.

Показники надійності	Визначення для показників надійності
Ймовірність правильного рішення операторської задачі P_{np}	Характеризує безпомилковість вирішення поставлених перед оператором завдань
Точність роботи оператора γ	Ступінь відхилення деякого параметра, що вимірюється, встановленого або регульованого оператором, від свого заданого або номінального значення.
Своєчасність вирішення задачі оператором P_{ce}	Оцінюється ймовірністю того, що завдання, поставлене оператору, буде вирішено за час, який не перевищує допустимий.
Загальний показник надійності оператора P_z	Визначається як добуток ймовірності правильного і своєчасного вирішення задачі оператором.

Вплив психологічних факторів на надійність роботи оператора визначають наступні показники: безвідмовність, своєчасність, відновлюваність, готовність, психофізіологічна напруженість.

Під помилкою оператора розуміють неправильне виконання або невиконання ним вказаних дій, що веде до появи аварійної ситуації або до створення такої ситуації, яка може призвести до аварійного ефекту.

Модель надійності оператора можна визначити, як математичну модель, яка встановлює зв'язок між показниками надійності оператора, характеристиками надійності елементів ергатичної структури і параметрами процесу її функціонування. Однак, не всі моделі помилок, що застосовуються в теорії надійності можна використовувати для розрахунків ергатичних систем, багато з них мають ряд недоліків неприйнятних для використання в даних системах. Існують критерії, яким повинні відповідати моделі розподілу помилок оператора в інтервалі часу обумовленому особливостями його функціонування. Такими критеріями є: релевантність, адекватність, можливість виконання розрахунків надійності системи, універсальність і практична придатність.

Розрахунок безпомилковості оператора повинен враховувати той факт, що оператор функціонує в умовах перешкод і має право на помилку при виконанні функціональних обов'язків з подальшим відновленням своєї працездатності.

9.4. Головні вимоги до інформаційно-функціональної моделі надійності оператора

Система організації управління обладнанням електростанцій є ергатичній системою управління, яка включає в якості елементів як технічні засоби, так і операторів, які взаємодіють з цією системою. Отже, при оцінці надійності системи інженери повинні аналізувати обидва елементи.

Про вплив оператора на надійність свідчить велике число відмов апаратури, що виникають з вини людини. Частота відмов з вини людини становить від 20 до 95% всіх відображених у звітній документації відмов.

Оператор являє собою значно складнішу систему, ніж будь-яка машина, яка працює або буде розроблена в майбутньому. В даний час жодна машина не може в повній мірі замінити людину-оператор. Оператору внутрішньо властива менша стабільність в порівнянні з машиною. На нього впливає значно більше число факторів. Робота оператора залежить від його фізіологічного стану, ступеня втоми, впливів оточуючих подразників (наприклад, шуму), тривалості навчання, спонукальних мотивів, стимулювання та інших факторів.

Виходячи з цього можливо сформулювати основні вимоги до інформаційно-функціональної моделі надійності (ІФМН) оператора аналітичної системи (АНС) (рис. 9.4).

Крім того помилки оператора можливо класифікувати за місцем у структурі діяльності (рис. 9.5), за наслідками (рис. 9.6) та згідно причин їх виникнення (рис 9.7).

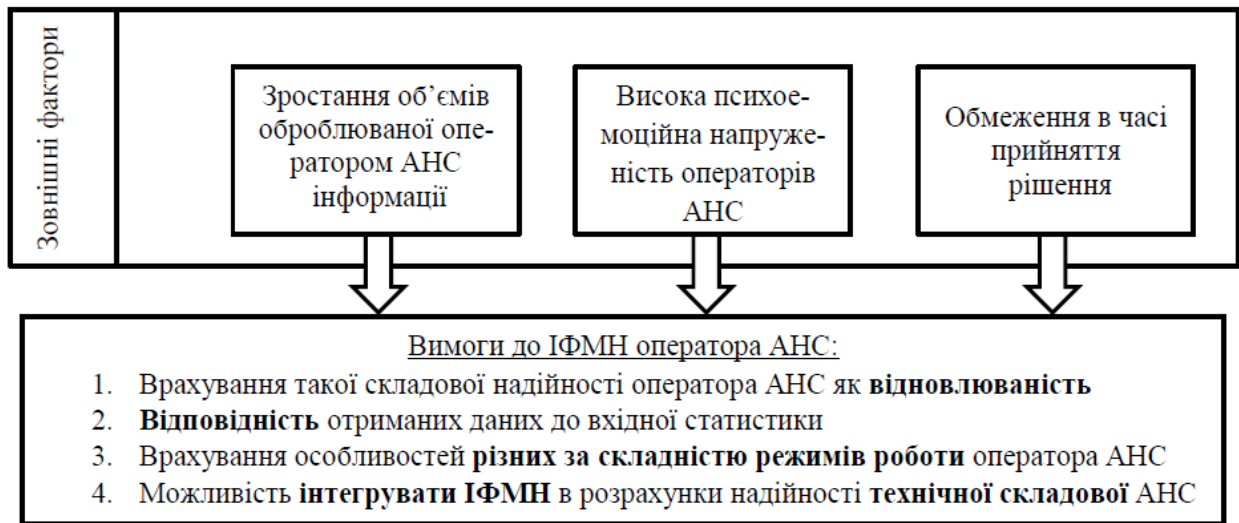


Рис. 9.4. Вимоги до інформаційно-функціональної моделі надійності оператора.

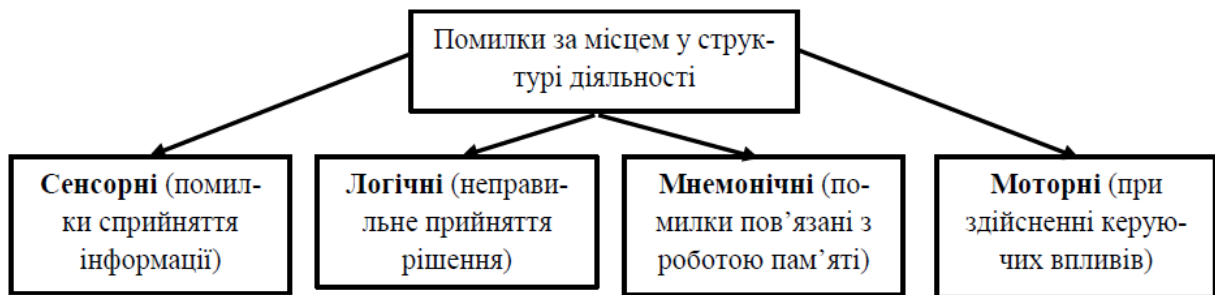


Рис. 9.5. Класифікація помилок оператора за місцем у структурі діяльності.



Рис. 9.6. Класифікація помилок оператора АНС за наслідками.

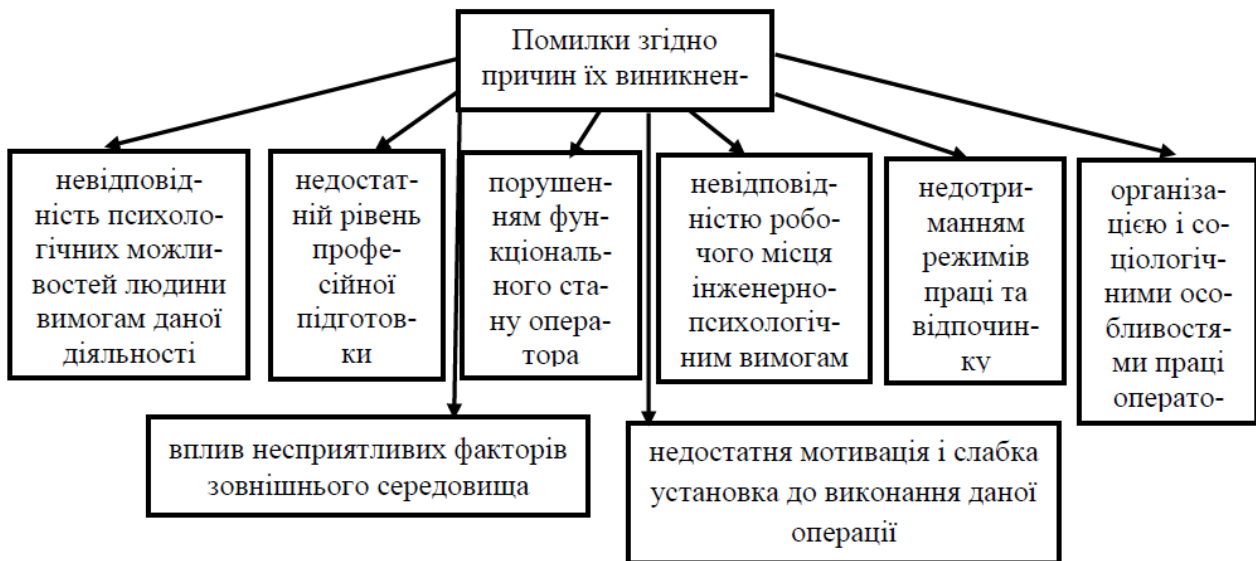


Рис. 9.7. Класифікація помилок оператора згідно причин їх виникнення.

Розглянутий набір критеріїв аналізу та класифікації помилок оператора визначає послідовність проведення їх психологічного аналізу і дозволяє об'єднати в єдину систему велике число різнорідних чинників, що призводять до появи помилок.

Для реєстрації помилок, а також умов і обставин, при яких вони виникли, використовують традиційні методи і прийоми інженерно-психологічного вивчення діяльності людини: методи спостереження, опитування, об'єктивної реєстрації якості виконання технологічних операцій і дій (хронометраж, кінореєстрація, циклографія та ін.), прийоми професіографії.

9.5. Структурна модель надійності оператора

Таким чином, структурна модель надійності системи будується на основі аналізу впливу помилок оператора на надійність системи в цілому. Для визначення елементів структури надійності оператора розглянемо складові його надійності (рис. 9.8).



Рис. 9.8. Складові надійності оператора та підходи до їх розрахунку.

У ІФМН оператора *безпомилковість* враховується за допомогою ймовірності безпомилкової роботи $R(t)$. Ймовірність безпомилкової роботи характеризує ступінь стійкої працездатності оператора протягом заданого робочого циклу. Ймовірність безпомилкової роботи оператора – це ймовірність того, що за певний проміжок часу помилка у роботі оператора не відбулась.

Структуру надійності оператора можна розділити на чотири основні групи (рис 9.10).

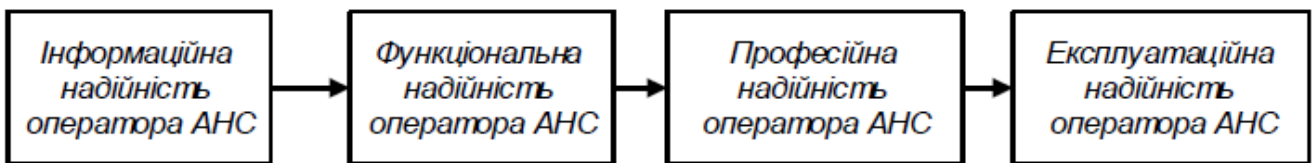


Рис. 9.10. Складові структурної надійності оператора.

При кількісних оцінках надійності інформаційну, функціональну, професійну та експлуатаційну складові надійності розглядають як послідовно

з'єднані ланки цілісної фізичної системи, якою є оператор. В системі з послідовною структурою помилка оператора через будь-яку з представлених на рис. 9.10 причин призводить до відмови фізичної системи в цілому. Виходячи з цього, структурна ймовірність безпомилкової роботи оператора може бути представлена формулою:

$$R_{ст}(t) = R_{інф}(t) \cdot R_{функ}(t) \cdot R_{проф}(t) \cdot R_{експ}(t) ,$$

де $R_{ст}(t)$, $R_{інф}(t)$, $R_{функ}(t)$, $R_{проф}(t)$, $R_{експ}(t)$ – складові ймовірності безпомилкової роботи оператора (структурна, інформаційна, функціональна, професійна і експлуатаційна, відповідно).

Інформаційна надійність оператора – властивість оператора оброблювати інформаційні потоки безпомилково в заданому інтервалі часу та при заданих зовнішніх умовах.

Функціональна надійність оператора – властивість функціональних систем оператора забезпечувати його стійкість при виконанні професійних завдань протягом певного часу і з заданим рівнем якості.

Професійна надійність оператора – властивість оператора безпомилково і своєчасно приймати рішення, що веде до досягнення конкретної мети в заданих умовах при взаємодії з технічними засобами й іншими фахівцями та його готовність до прийняття рішення.

Експлуатаційна надійність оператора – властивість оператора зберігати працездатний стан протягом заданого часу робочої зміни за впливу зовнішніх факторів та перешкод.

Використовуючи метод експертного оцінювання були виявлені найбільш значущі для операторів експлуатаційні параметри (рис. 9.11).

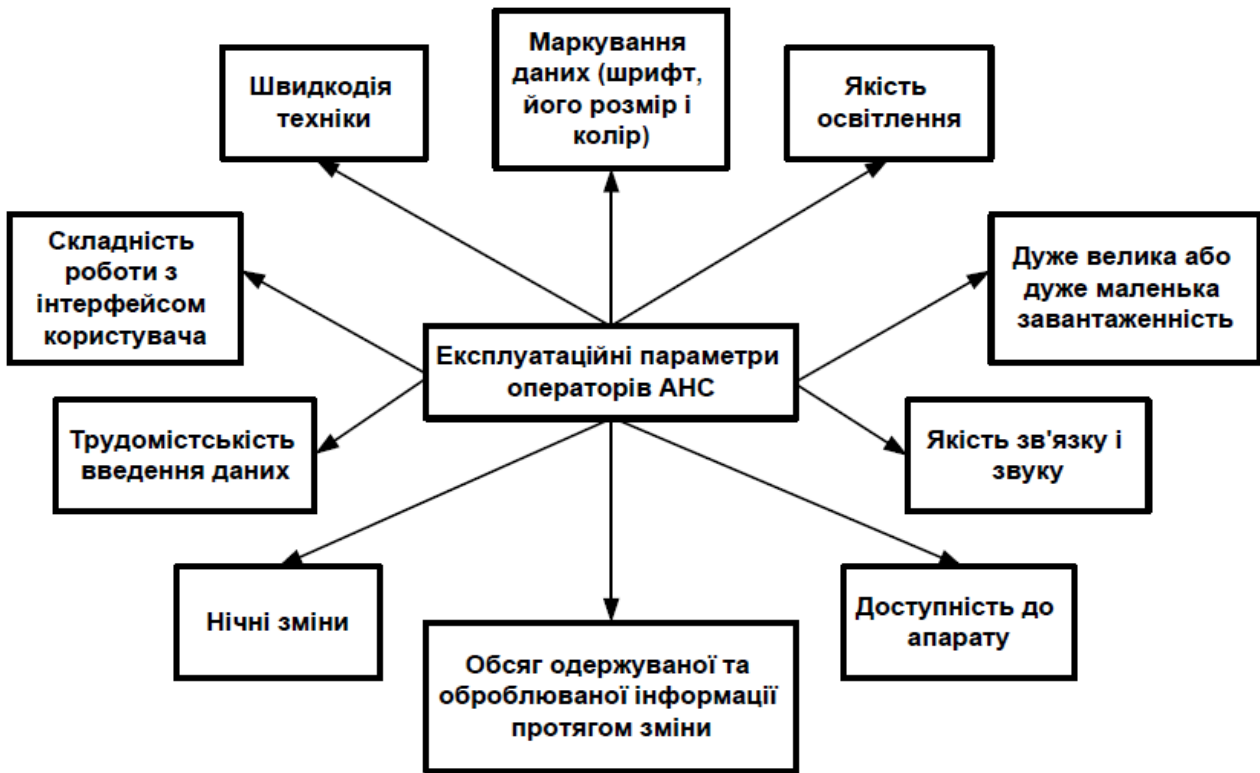


Рис. 9.11. Експлуатаційні параметри операторів.

9.6. Інформаційний стрес та його вплив на рівень інформаційної надійності оператора

Стрес нерідко сприймається як особливий функціональний стан і в той же час як психофізіологічна реакція організму на впливи навколишнього середовища, що виходять за межі адаптивної норми. В цілому стрес являє собою неспецифічний компонент адаптації, який грає мобілізуючу роль і що обумовлює залучення фізіологічних ресурсів для адаптаційної перебудови організму.

Проблема стійкості, надійності діяльності оператора в умовах впливу екстремальних факторів і розвитку психологічного стресу привернула до себе підвищену увагу і набула певні обриси як самостійна область досліджень у зв'язку з розвитком техніки, систем автоматизованого управління виробництвом і, особливо, комп'ютеризацією всіх сфер діяльності.

Діяльність оператора пов'язана з періодичним, іноді досить тривалим і інтенсивним впливом (чи очікуванням впливу) екстремальних значень

професійних, соціальних, екологічних чинників, яке супроводжується негативними емоціями, перенапруженням фізичних і психічних функцій, деструкцією діяльності.

Найбільш характерним психічним станом, що розвивається під впливом зазначених факторів у оператора, є психологічний стрес. Розвиток стресу в екстремальних умовах операторської діяльності може бути пов'язаний також з можливістю, очікуванням, загрозою впливу на оператора різноманітних подразників фізико-хімічної, психологічної (особистісної), організаційної та, насамперед, професійної природи.

На цій підставі даний стан можна вважати типовою формою професійного стресу. В умовах впливу на оператора екстремальних значень інформаційних чинників професійної діяльності у нього відзначаються зміни біохімічних реакцій, ряду фізіологічних функцій і деяких психофізіологічних показників, характерних для ефектів впливу фізико-хімічних стресорів і є неспецифічною адаптаційною реакцією організму. Найбільш поширені фактори, що викликають стрес інформаційного змісту наведено на рис. 9.12.

Інформаційний стрес оператора - це такий стан оператора, який виникає в ситуаціях інформаційних перевантажень, коли він не справляється із завданням, не встигає приймати правильні рішення в необхідному темпі при високому ступені відповідальності за наслідки прийнятих рішень.

Стрессова реакція - зміна рівня активності під впливом тих чи інших стресорів.

Найбільш інформативними серед фізіологічних маркерів є показники серцевого ритму і шкірно-гальванічного рефлексу. Обидва показники зазнають впливу основних складових емоційної реакції. В якості біохімічних маркерів використовують рівень гемоглобіну і глюкози в крові оператора.

Вивчення причин виникнення інформаційних стресів і механізмів їх формування допомагає знизити рівень їхнього впливу на організм оператора, а також сприяти підтриманню рівня надійності оператора. При виникненні

інформаційного стресу ймовірність безпомилкової роботи оператора знижуються в залежності від тривалості стресу та призводить до загального зниження рівня надійності оператора. Виходячи з цього, був введений коефіцієнт γ - ймовірність виникнення інформаційного стресу.

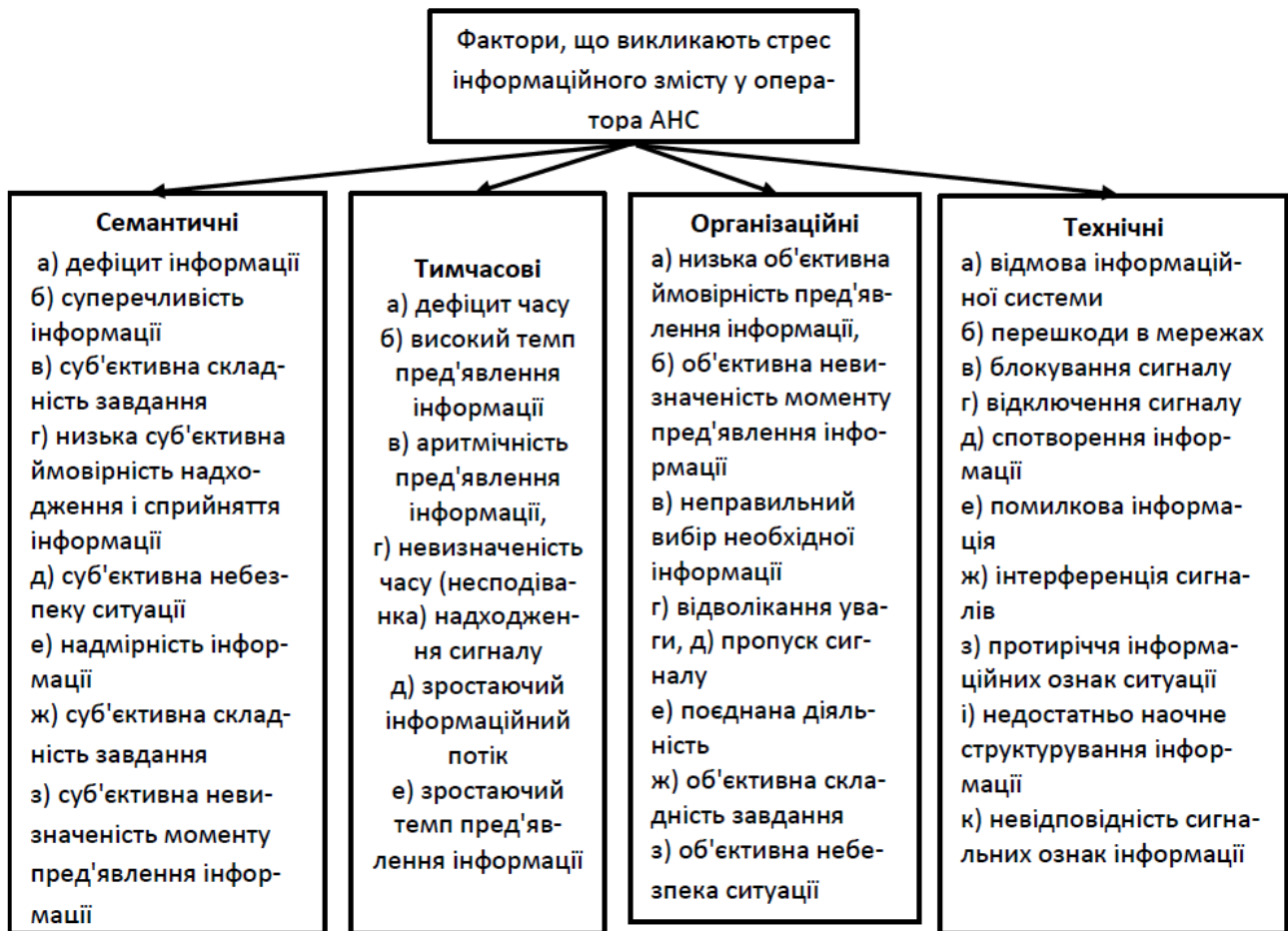


Рис. 9.12. Фактори, що викликають стрес інформаційного змісту.

Інформаційне перевантаження - характеризує труднощі розуміння проблеми і прийняття рішень, причиною яких є надлишок інформації. Суть інформаційного перевантаження полягає в тому, що кількість корисної інформації перевершує об'єктивні можливості її сприйняття людиною.

Корисною є інформація, яка необхідна для вирішення завдань, що забезпечують життєдіяльність особистості або організації. При великому інформаційному навантаженні оператор втрачає можливість адекватно і достовірно оцінювати ситуацію і приймати правильне рішення.

9.7. Комбінований метод визначення функціональної надійності оператора

Завданням комбінованого методу визначення функціональної надійності оператора є підвищення достовірності визначення функціональної придатності оператора безпосередньо перед виконанням службового завдання.

Проблема вирішується за рахунок того, що включає проходження тестування у вигляді виконання оператором комплексу психофізіологічних особистісних тестів з подальшим порівнянням отриманих результатів з допустимими значеннями, отриманими по групі випробовуваних з високою професійною успішністю, а також вимірювання психофізіологічних параметрів з аналізом результатів вимірювань, відповідно до корисної моделі, вимірювання психофізіологічних параметрів оператора проводять заздалегідь, одночасно з проходженням тестування для виявлення закономірності взаємозв'язку значень виміряних психофізіологічних параметрів з результатами тестів з обраним критерієм, після чого вибирають групу психофізічних параметрів, за значеннями яких можна судити про функціональну придатність оператора для виконання поставлених завдань в заданих умовах, а безпосередньо перед допуском оператора до виконання завдань, контролюють поточні значення даних параметрів за допомогою методів неруйнівного контролю.

Запропонований метод полягає у наступному. Заздалегідь проводять тестування оператора в різних умовах у вигляді виконання ними комплексу психофізіологічних особистісних тестів. При цьому проводиться тестування розумової працездатності, логічного мислення, врівноваженості нервових процесів, уваги, здатності до прогнозування, оперативного мислення, довготривалої пам'яті, швидкості протікання розумового процесу при оперуванні з числовим матеріалом та інших властивостей, важливих для виконання того чи іншого завдання. Критерієм оцінки функціональної придатності оператора може бути, кількість допущених ним під час процедури

помилки. Отримані дані порівнюються з допустимими значеннями, отриманими по групі випробовуваних з високою професійною успішністю.

Одночасно з проведенням тестування вимірюють психофізіологічні параметри випробуваного, в якості яких можуть бути прийняті параметри дихання, серцево-судинної активності, електричний опір шкіри, параметри крові, спектральні коефіцієнти відбиття ділянок тіла і очного яблука, параметри нервової системи, параметри голосу, температурні параметри, параметри результату аналізу психосемантичних полів, параметри результатів психозондування.

Результати тестування і вимірювань піддають статистичній обробці з метою виявлення кореляційного взаємозв'язку між значенням критерію ефективності і значеннями вимірних психофізіологічних параметрів. Після цього вибирають групу психофізичних параметрів, за значеннями яких можна судити про функціональну придатність оператора для виконання поставлених завдань в заданих умовах, тобто вибираються певні індекси параметрів особливо характерних для певного оператора.

Надалі, безпосередньо перед допуском оператора до виконання завдань, контролюють поточні значення даних параметрів за допомогою методів неінвазійної діагностики параметрів крові.

Наприклад, в результаті тестування виявлено, що втомлений оператор допускає неприпустиму в нормальних умовах кількість помилок. Одночасно з цим відзначається підвищене серцебиття і збільшення очного тиску. Таким чином, виникає оперативна можливість виключити ризики шляхом проведення відповідних вимірювань безпосередньо перед виконанням завдання або початком чергування. У іншого оператора, в абсолютно аналогічних умовах, які також призводять до збільшення помилок, можуть мати місце інші прояви, наприклад, тремтіння рук, порушення мови, зміна електропровідності шкіри тощо.

Запропонований комбінований метод дозволяє підвищити достовірність результатів визначення функціональної придатності та надійності оператора безпосередньо перед виконанням службового завдання, за рахунок урахування індивідуальних властивостей кожного оператора, а так само зменшити час аналізу за рахунок вимірювань групи параметрів, що несуть основну інформацію про стан конкретного випробуваного.

Контрольні запитання

1. У чому полягають переваги ергатичних систем?
2. Яким чином здійснюється і від чого залежить операція стеження?
3. Які існують психологічні механізми помилок людини-оператора?
4. Якими є основні показники надійності оператора?
5. Яким чином визначаються складові структурної надійності оператора?

10. ОЦІНКА ВПЛИВУ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

10.1. Загальні положення

Проблема забезпечення довговічності та надійності високонавантажених конструктивних елементів парових турбін та турбогенераторів є актуальною проблемою сучасної енергетики. З кожним роком ця проблема стає все гострішою у міру вичерпання ресурсу енергогенеруючого обладнання та потребує вирішення.

Одними з найбільш небезпечних для міцності елементів парових турбін є динамічні режими навантаження, що мають місце, наприклад, при проходженні через критичні швидкості обертання валу турбіни (поперечні коливання), а також при позаштатних режимах турбогенератора (крутильні коливання). Причинами небезпеки цих режимів навантаження є складність оцінки їх реальної величини та інтенсивності, а також та обставина, що міцність матеріалів при знакозмінному навантаженні у кілька разів нижча, ніж їхня статична міцність.

При аналізі коливальних процесів, що відбуваються у паровій турбіні, основну увагу зазвичай приділяють поперечним коливанням валу. Дійсно, значні по амплітуді згинальні коливання роторів турбіни виникають у процесі її розгону та зупинки при проходженні через критичні швидкості обертання валу. У той же час не менш, а в ряді випадків набагато небезпечнішими є крутильні коливання валу турбіни, зумовлені деякими специфічними режимами турбогенератора.

10.2. Крутильні коливання

У 1974 р. на електростанції Галлатін (США) сталася катастрофічна руйнація ротора середнього тиску парової турбіни потужністю 225 МВт [7]. Аналіз характеру поширення тріщини в роторі турбіни дозволив зробити висновок, що тріщини розвивалися протягом кількох років під дією дотичних напружень (рис.

10.1).

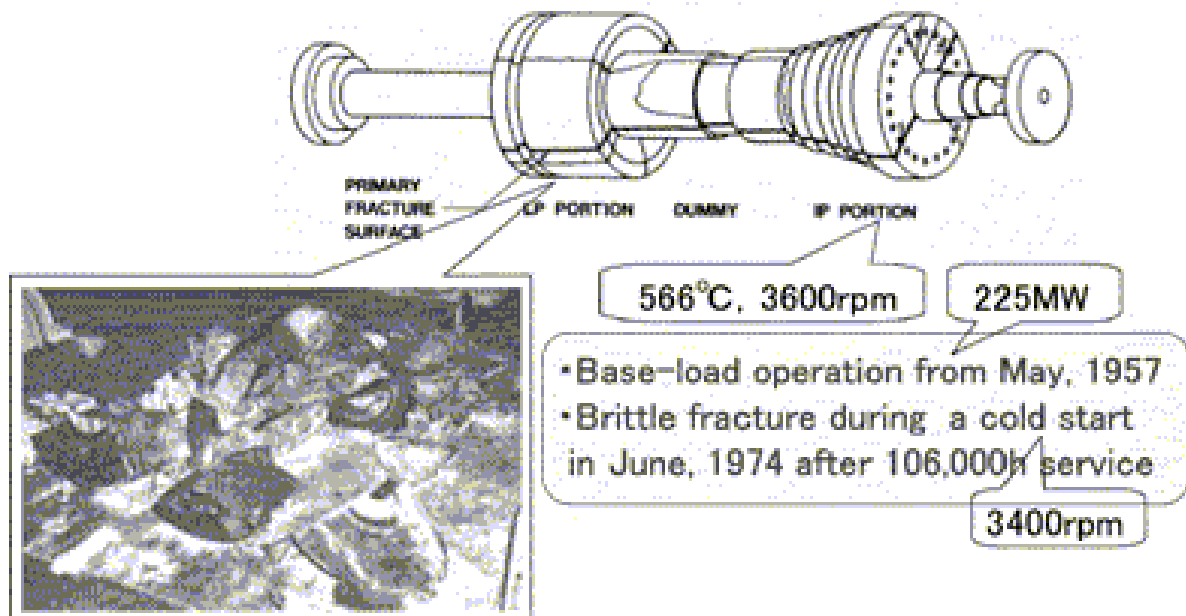


Рис. 10.1. Площини руйнування ротора турбіни.

У 2002 р. сталася руйнація третього енергоблоку Каширської ГРЕС. За результатами розслідування цієї аварії основною причиною руйнування валу турбіни було названо накопичення втомного ушкодження в результаті крутильних коливань валу турбіни.

Основні причини крутильних коливань валопроводу турбіни:

- режим короткого замикання на турбогенераторі;
- моменти включення турбогенератора до мережі з грубою синхронізацією;
- динамічна нестійкість системи турбогенератор – мережа;
- нерівномірність електричного поля генератора.

При цьому, незважаючи на велику потенційну небезпеку крутильних коливань валопроводу, їх реєстрація на парових турбінах, що експлуатуються, не проводиться. Тому прямі дані про рівень крутильних коливань валу турбіни при динамічній взаємодії з генератором відсутні. Отже, оцінити цей рівень, а також відповідний рівень втомної пошкодженості матеріалу роторів при різних сценаріях динамічного впливу з боку генератора на вал турбіни, в даний час

можна лише на підставі моделювання цього впливу.

Втомне пошкодження накопичується в матеріалі в результаті тривалої дії змінних навантажень. Короткі замикання на турбогенераторі трапляються кілька разів під час експлуатації турбіни. За деяких умов результатом короткого замикання може бути миттєве руйнування турбіни, проте накопичення втомного пошкодження матеріалу валопроводу внаслідок коротких замикань малоймовірне.

Причини накопичення втомного ушкодження валопроводу турбіни – в її періодичних пусках, які є типовими для теплових турбоагрегатів, що працюють у маневреному режимі з метою компенсації нерівномірності споживання електроенергії протягом доби. Встановлена кількість таких пусків-зупинок під час експлуатації турбіни становить 2000 (один з ресурсних параметрів турбіни), а при продовженні ресурсу – 2500 і більше.

При кожному пуску турбіни відбувається не менше одного підключення турбогенератора до мережі (підключити турбогенератор до мережі не завжди вдається з першої спроби, тому реальна кількість підключень турбіни до мережі в кілька разів перевищує встановлене). При цьому через різницю кутів зсуву фаз між векторами електрорушійної сили турбогенератора і електричної напруги на турбогенераторі виникає короткочасний реактивний електромагнітний момент (реактивним цей момент названий тому, що він діє в напрямку протилежному напрямку обертання ротора), що призводить до виникнення крутильних коливань інтенсивності та, як наслідок, до втомного пошкодження матеріалу валопроводу (рис. 10.2).

Валопровід турбіни складається з ротора високого, середнього і низького тиску (відповідно РВТ, РСТ і РНТ) і турбогенератора (ТГ).

Аналіз перехідних процесів у синхронних машинах показав, що максимальні значення крутильних коливань валу при включенні турбогенератора в мережу з грубою синхронізацією може значно перевищувати такі при режимі раптового короткого замикання, який до теперішнього часу

розглядався як найважчий у сенсі механічних навантажень. Виникає при кожному пуску коливальний процес може продовжуватися від декількох десятків до декількох тисяч циклів коливань з максимальними напруженнями, що перевищують границю витривалості матеріалу, що призводить до циклічного пошкодження матеріалу, що поступово накопичується за час експлуатації турбіни. Ступінь циклічного пошкодження матеріалу залежить від рівня максимальної напруги та рівня демпфування коливань у системі. Останній визначає темп загасання вільних крутильних коливань валопроводу (рис. 10.3).

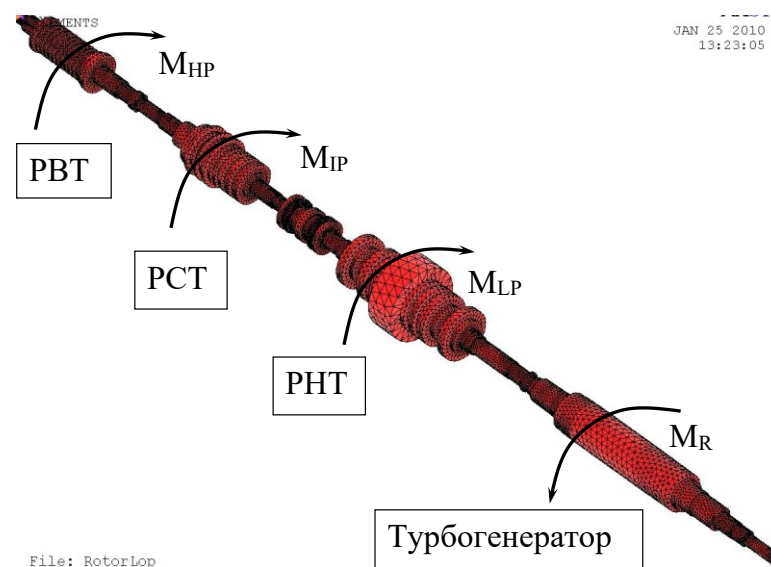


Рис. 10.2. Схема динамічного навантаження валопроводу турбіни.

Величина реактивного моменту зростає пропорційно до величини кута зсуву фаз і досягає величезних значень, що перевищують номінальний момент до 8 разів (рис. 10.3, а). Оскільки ці функції загасають, практично повне згасання електромагнітних процесів на турбогенераторі відбувається приблизно за 4 секунди.

Особливість підключення турбогенератора до мережі полягає в тому, що воно може бути успішним та неуспішним. При успішному підключенні турбогенератор не відключається від мережі, а реактивний крутний момент, що виникає на турбогенераторі, поступово згасає. У разі неуспішного підключення через значні вібрації турбіни турбогенератор аварійно відключають від мережі.

При цьому реактивний момент практично раптово зникає. Крутильні коливання валопроводу турбіни при успішному та неуспішному підключенні турбогенератора до мережі відрізняються за характером та величиною.

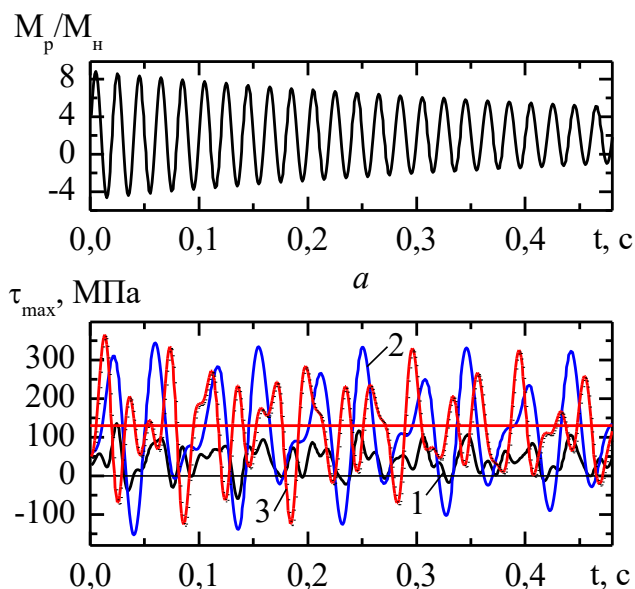


Рис. 10.3. Крутильні коливання валопроводу турбіни від дії реактивного моменту (успішне підключення): 1 – ділянка між ЦВТ і ЦСТ; 2 – ділянка між ЦСТ і ЦНТ; 3 – ділянка між ЦНТ і ТГ.

Так, при успішному підключенні турбогенератора крутильні коливання валопроводу підтримуються на відносно високому рівні протягом практично всього часу дії реактивного моменту.

Рівень крутильних коливань за умови успішного підключення турбогенератора до мережі значною мірою визначається дисипативними властивостями механічної системи. В умовах відсутності даних про демпфуючу здатність турбіни, у розрахунках декремент крутильних коливань варіювали в діапазоні $\delta=2\dots30\%$. Здатність механічної системи інтенсивно поглинати енергію коливань знижує крутильні коливання валопроводу турбіни до безпечного рівня після декількох перших циклів деформування. При низькому демпфуванні коливань у системі циклічні напруження підтримуються на пошкоджуючому рівні значно більш тривалий час, який визначається часом дії крутного реактивного моменту до його повного згасання.

При неуспішному підключенні турбогенератора до мережі здійснюється аварійне відключення. Процеси, які при цьому відбуваються на турбогенераторі, подібні до процесів при відключенні раптового короткого замикання. Інтенсивність крутильних коливань валопроводу турбіни, що виникають внаслідок раптового короткого замикання на турбогенераторі, залежить не стільки від його тривалості, скільки від співвідношення між тривалістю короткого замикання (тобто тривалістю дії реактивного крутного моменту з боку турбогенератора) і періодом власних коливань. Таким чином, при одних співвідношеннях відключення короткого замикання призводить до збудження небезпечних з погляду циклічної міцності крутильних коливань валопроводу, а за інших – здатне збудити лише відносно невеликі за величиною коливання.

Аналогічні закономірності мають місце при неуспішному підключенні турбогенератора до мережі.

Червона горизонтальна лінія на рис. 10.3 позначає границю втоми роторної сталі при циклічному крученні. Перевищення цієї границі означає виникнення пошкодження в матеріалі, яке, накопичуючись протягом всього часу експлуатації турбіни, призводить до її катастрофічного руйнування.

При виникненні умов циклічного пошкодження роторної сталі в результаті його крутильних коливань його можна оцінити на підставі гіпотези Пальмгрена-Майнера

$$P = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{ip}},$$

де n – кількість пошкоджуючих циклів коливань (пошкоджуючими вважаються ті цикли, при яких напруження τ_{imax} перевищує границю втоми матеріалу валопроводу τ_{-1} ; N_{ip} – число циклів до руйнування при циклічному навантаженні з напруженням τ_{imax} .

Розрахунки циклічної пошкоженості були виконані на підставі кривої втоми для роторної сталі 25X1МФА [8], яка була отримана в умовах симетричного циклу навантаження та за нормальної температури (рис. 10.4).

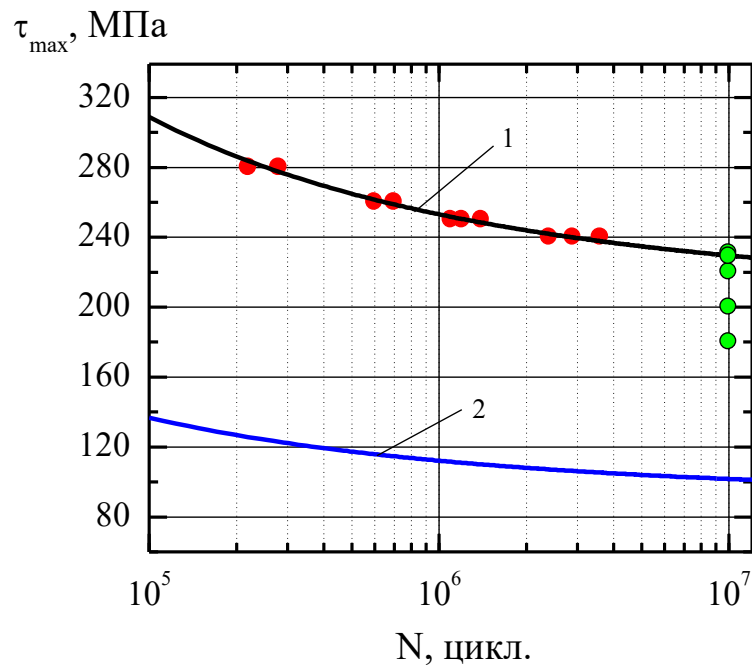


Рис. 10.4. Крива втоми для роторної сталі при циклічному крученні: 1 – висхідна крива; 2 – з урахуванням поправочних коефіцієнтів.

Вплив масштабного фактору, асиметрії циклу та температури на втомні властивості сталі було враховано за допомогою поправочних коефіцієнтів

$$\tau_{max} = K_M K_a K_t [\eta_0 + \eta_v(N)^c + \eta_u(N)^b],$$

де $\eta_0=208,3$; $\eta_v=3176,2$; $\eta_u=1,86 \cdot 10^5$; $c=-0,3114$; и $b=-0,8348$; N – кількість циклів навантаження; K_M – коефіцієнт масштабного фактору; K_a – коефіцієнт впливу середнього напруження циклу; K_t – температурний коефіцієнт. На основі експериментальних даних було прийнято $K_M=0,58$ і $K_t=0,78$. Коефіцієнт впливу середнього напруження циклу визначався за формулою

$$K_a = \frac{\sqrt{\tau_{-1}^2 - k^2 \psi_\tau^2 \tau_m^2}}{\tau_{-1}},$$

де $\tau_{-1}=230$ МПа; $k=0,922$; $\psi_\tau=0,505$.

За 2000 пусків турбіни сумарне пошкодження визначається як $P_{сум}=2000 \cdot P$.

Результати розрахунків циклічної пошкодженості матеріалу валопроводу турбіни при крутильних коливаннях, що виникли в результаті успішного

підключення асинхронного турбогенератора до мережі, наведені в табл. 10.1. При $P_{\text{сум}} \geq 1$ матеріал валопроводу досягає граничного стану, тобто не здатен виконувати свої функції (критичне деформування, зношування або руйнування).

Таблиця 10.1. Розрахунок відносної пошкодженості матеріалу валопроводу при успішному асинхронному підключенні турбогенератора до мережі.

θ , град.	δ , %	Ділянка валопроводу	n	$P_{\text{сум}}$
30	2	1	0	0
		2	26	2,047
		3	19	1,180
	30	1	0	0
		2	2	0,113
		3	3	0,167
60	2	1	0	0
		2	42	6,791
		3	20	3,468
	30	1	0	0
		2	3	0,414
		3	4	0,669
90	2	1	0	0
		2	48	12,1
		3	26	7,218
	30	1	0	0
		2	3	0,762
		3	4	1,343
120	2	1	3	0,003
		2	59	14,531
		3	39	9,735
	30	1	0	0
		2	3	0,969
		3	10	1,776

Відносну пошкодженість валопроводу можна трактувати як ймовірність відмови. Таким чином, як це очевидно з табл. 10.1 при асинхронному підключенні турбогенератора до мережі зі зсувом фаз $\theta=30^\circ$ ймовірність відмови турбіни в результаті руйнування валопроводу в елементах 2 і 3 виникає лише у разі низького рівня демпфування ($\delta=2\%$). При значному демпфуванні у системі ($\delta=30\%$) відносна пошкодженість матеріалу валопроводу не перевищує 16%, що створює значний запас залишкової довговічності.

Зі збільшенням кута зсуву фаз θ збільшується кількість пошкоджуючих циклів коливань n і, відповідно, збільшується відносна пошкодженість матеріалу валопроводу. Слід зазначити, що сценарії накопичення ушкодження, представлені в табл. 10.1, є оптимістичними у сенсі кількості пусків. Реальне їхнє число може у кілька разів перевищувати встановлене, тобто 2000 пусків.

На відміну від успішного підключення турбогенератора до мережі при оцінці циклічної пошкодженості матеріалу валопроводу при неуспішному асинхронному підключенні необхідно враховувати також тривалість дії крутного реактивного моменту, оскільки інтенсивність крутильних коливань валопроводу істотно залежить від цього фактору.

Аналіз крутильних коливань валопроводу турбіни в результаті асинхронного підключення турбогенератора до мережі дозволяє сформулювати заходи, здійснення яких підвищить надійність турбіни при експлуатації:

1. Реєстрація крутильних коливань валопроводу турбіни при експлуатації.
2. Використання конструкційних матеріалів з високою демпфіруючою здатністю для зменшення інтенсивності коливань.
3. Недопущення при експлуатації виникнення пошкоджуючих амплітуд крутильних коливань за рахунок точної синхронізації при підключенні турбогенератора до мережі.
4. Зменшення кількості неуспішних підключень.

10.3. Поперечні коливання

Основними причинами появи поперечних коливань валопроводу турбіни є невірноваженості обертальних елементів (валу, дисків, робочих лопаток), зношення підшипників, неспіввісність турбіни і турбогенератора, пошкодження типу тріщини (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Причини поперечних вібрацій турбіни.

Відцентрова сила що провокує механічні коливання має радіальний напрямок. Жорсткість механізму у вертикальному напрямі зазвичай вища, ніж в горизонтальному. Відповідно вертикальна складова вібрації менша за горизонтальну. Оскільки головною задачею механізму є реалізація обертального руху, то для осьового руху об'єкт не призначений. Тому осьова складова вібрації повинна мати найменше значення. Збільшення осьової складової може бути пов'язане з появою додаткового ступеня свободи, або з дією дефектів, що провокують динамічні сили в осьовому напрямі.

Збільшення вібрації переважно у вертикальному напрямі викликається появою тріщин в опорах або основі, низькою жорсткістю основи, послабленням з'єднань. Підвищена горизонтальна складова вібрації визначається дисбалансом ротора, зношенням підшипників, послабленням посадки підшипників. Підвищення осьової складової вібраційних процесів виникає при порушенні центрування валів, дефектах муфт і неправильному монтажі або регулюванні підшипників.

Коливання механічної системи характеризується власною частотою і формою коливань. Співпадіння власної частоти коливань з частотою зовнішньої сили зумовлює резонанс, тобто значне збільшення амплітуди коливань.

Оскільки турбіна є складною механічною системою, теоретично вона має

безкінечну кількість власних частот, а отже, і резонансів. Наприклад, розрахунки власних форм і частот поперечних коливань для потужної турбіни з турбогенератором на 1150 МВт, виконані методом скінчених елементів [9] з використанням доволі складної моделі (рис. 10.6), продемонстрували наявність значної їх кількості в діапазоні від 0 до 3000 об/хв (рис. 10.7).

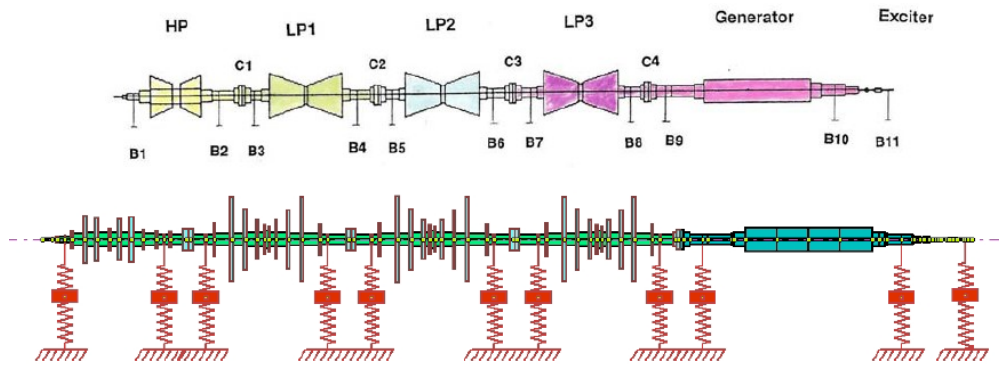


Рис. 10.6. Модель турбіни з турбогенератором на 1150 МВт.

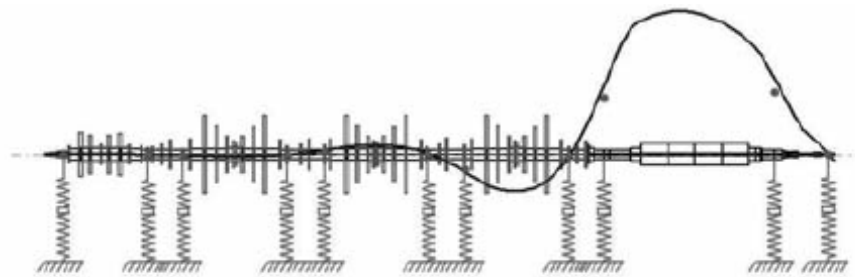


Figure 7: 1st T-G Mode at 637 RPM - Generator

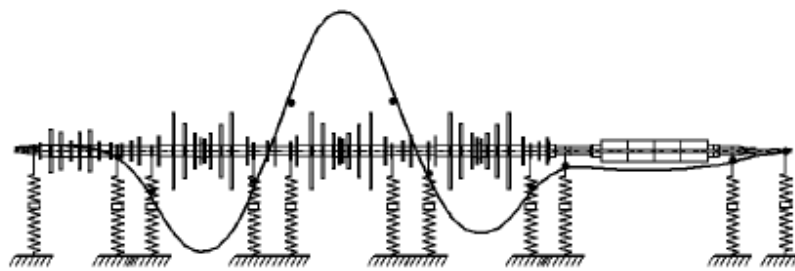


Figure 8: 2nd T-G Mode at 706 RPM

Рис. 10.7. Власні форми і частоти коливань системи турбіна-турбогенератор.

Це означає, що при пуску турбіни в процесі набирання обертів будуть виникати резонанси на кожній з цих частот, тобто виникати значні за амплітудою поперечні коливання. Якщо амплітуда цих коливань буде перевищувати

границю втоми роторної сталі при циклічному згині, то виникатиме втомне пошкодження матеріалу.

За відомих амплітуд поперечних коливань і їхньої кількості можна оцінити сумарне пошкодження матеріалу в результаті проходження через резонанси за методикою, наведеною для крутильних коливань. Треба зазначити, що при зупинці турбіни буде мати місце проходження через ті ж резонанси, але у зворотному порядку, з відповідним можливим накопиченням втомного пошкодження.

В цьому випадку при розрахунку пошкодженості матеріалу необхідно також враховувати вплив температури, масштабного фактору і асиметрії циклу на втомні властивості роторної сталі.

Пошкоджуючими циклами коливань будуть ті, амплітуди напружень яких перевищують границю втоми роторної сталі (рис. 10.8). Кількість пошкоджуючих циклів N_d буде прямопропорційною до частоти резонансу, і оберненопропорційною кутовому прискоренню турбіни при розгоні чи сповільненні і рівню демпфірування в системі.

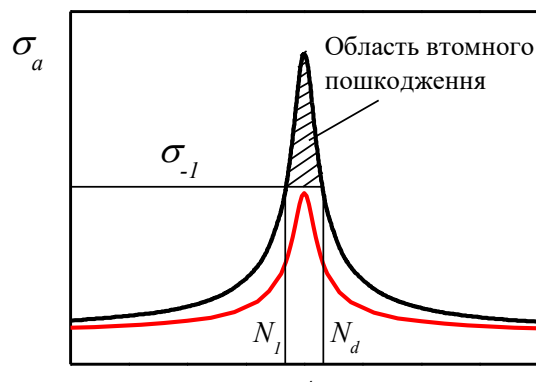


Рис. 10.8. Резонансні поперечні коливання валопроводу турбіни.

Червоним кольором на рис. 10.8 показано резонанс у випадку значного рівня демпфірування в системі. Оскільки максимальна амплітуда резонансу не досягає границі міцності, пошкодження матеріалу не відбувається.

Демпфування в механічній системі є ефективним засобом зниження амплітуди резонансних коливань (рис. 10.9). Тому створення

високодемпфуючих роторних сталей і використання потужних механічних демпферів коливань є перспективним способом підвищення надійності турбін.

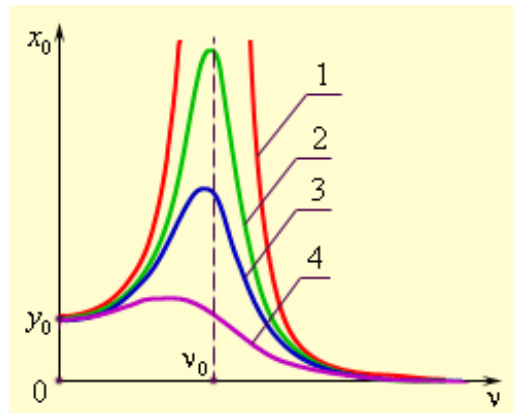


Рис. 10.9. Резонансні криві у випадку малого (1) середнього (2, 3) і великого (4) демпфування коливань в системі.

Таким чином, аналіз причин накопичення втомного пошкодження валопроводу турбіни дозволяє сформулювати заходи, здійснення яких підвищить надійність турбіни при експлуатації:

1. Здійснення вібраційного контролю валопроводу турбіни при експлуатації.
2. Досягнення номінальних обертів турбіни і зупинка турбіни повинні здійснюватися з максимально можливим кутовим прискоренням.
3. Необхідно використання високодемпфіруючих роторних сталей і потужних механічних демпферів коливань.
4. Необхідно створення і використання сталей з високим опором циклічному навантаженню.

10.4. Розрахунок коефіцієнту запасу міцності за складного динамічного навантаження

У найпростішому випадку розрахунок на витривалість виконується при стаціонарному навантаженні, коли амплітуда напружень є меншою за границю витривалості. У разі симетричних згинальних чи поздовжніх циклічних навантажень коефіцієнт запасу міцності визначають за формулою

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a} k_{\Sigma\sigma} ,$$

де σ_{-1} – границя витривалості при симетричному циклі навантаження; σ_a - амплітуда нормальних напружень; $k_{\Sigma\sigma}$ – коефіцієнт, що враховує вплив експлуатаційних факторів (температура, асиметрія циклу, масштабний фактор) на границю витривалості.

У разі симетричного циклічного кручення коефіцієнт запасу міцності визначають за формулою

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a} k_{\Sigma\tau} ,$$

Коефіцієнт запасу динамічної міцності за умови одночасної дії нормальних та дотичних напружень визначається наступною формулою

$$n_{\sigma\tau} = \frac{n_{\sigma} n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} .$$

Контрольні запитання

1. Якими є основні причини крутильних і поперечних коливань валопроводу турбіни?
2. Які чинники впливають на циклічну пошкодженість роторів турбіни?
3. Які заходи підвищують надійність турбіни при позаштатних режимах роботи турбогенератора?
4. Як рівень демпфування коливань в системі впливає на надійність турбогенератора?
5. Які заходи підвищують надійність турбіни при переході через критичні швидкості обертання?

11. ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

11.1. Предмет механіки руйнування

Зародження і розвиток локального пошкодження типу тріщини після тривалого періоду накопичення розсіяного втомного пошкодження зумовлює суттєвий перерозподіл напружень в околі тріщини. Для дослідження зміни напружено-деформованого стану в тілі з тріщиною і прогнозування закономірностей розвитку тріщини була створена механіка руйнування.

Механіка руйнування — розділ механіки твердого тіла, що вивчає закономірності зародження і розвитку неоднорідностей структури матеріалу типу тріщин, дислокацій, пор, включень тощо при статичних і динамічних навантаженнях.

Практичне використання механіки руйнування ґрунтується на аналітичному дослідженні напружено-деформованого стану в околі тріщини для різних її типів і видів навантаження, а також на експериментальному дослідженні швидкості розвитку тріщини.

Міцність тіла з тріщиною або з іншим типом несучільності суттєво відрізняється від міцності суцільного тіла. Причому це твердження стосується не тільки статичної міцності, але навіть в більшій мірі – міцності за знакозмінних навантажень.

У механіці руйнування широко використовується аналітичний апарат механіки суцільних середовищ, теорії пружності, теорії пластичності, матеріалознавства. Область інженерного застосування механіки руйнування розповсюджується на прогнозування руйнування структур із дефектами, дослідження опору руйнуванню конструкційних матеріалів в різних умовах експлуатації (в тому числі у агресивних середовищах, при радіаційному опромінюванні тощо), прогнозування ресурсу і надійності конструкцій з урахуванням випадкового характеру виникнення дефектів; розробка

композитних матеріалів; руйнування гірських порід в різних технологічних процесах видобування й переробки.

11.2. Характеристики тріщиностійкості

Основний об'єкт механіки руйнування – один з найрозповсюдженіший і небезпечних видів дефектів – дефект типу тріщини незалежно від механізму її утворення (силове навантаження, термічні напруження, корозія тощо).

Тріщина - екстремальний дефект, який представляє собою області з повністю порушеними міжатомними зв'язками (берега тріщин) і частково порушеними міжатомними зв'язками (вершина тріщини). Поверхня розділу берегів називається фронтом тріщини (рис. 11.1).

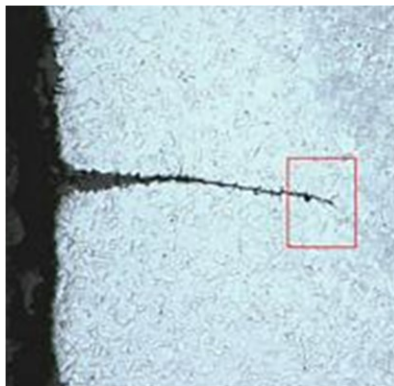


Рис. 11.1. Тріщина втоми (вершина тріщини – у червоному прямокутнику).

Поведінка тріщини в конструктивному елементі залежить від здатності матеріалу чинити опір росту тріщини, значень і характеру прикладених навантажень, впливу навколишнього середовища, довжини тріщини тощо.

Швидкість поширення тріщини в матеріалі може досягати 0,2-0,3 від швидкості поширення звуку в цьому середовищі. Так, найбільша швидкість росту тріщини спостерігається в алмазах - близько 8 км / с.

Поширення тріщини, яке є руйнуванням міжатомних зв'язків матеріалу, супроводжується характерним (проте різним для різних матеріалів) звуком (тріском - звідси назва). Такий звук називають акустичної емісією.

Залежно від розташування фронту тріщини щодо прикладеного навантаження розрізняють три типи тріщин (рис. 11.2): тріщина нормального відриву (тип I), тріщина поздовжнього зсуву (тип II), тріщина поперечного зсуву (тип III).

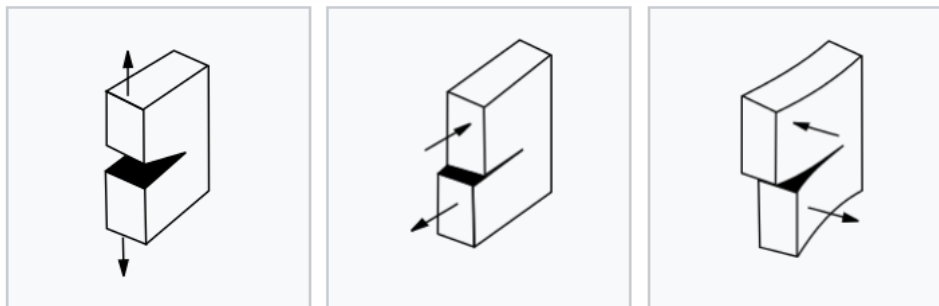


Рис. 11.2. Типи тріщин в залежності від взаємного переміщення її берегів.

Для опису полів напружень поблизу вершини тріщини у лінійній механіці руйнування (задача вирішується у пружній постановці) використовується поняття *коефіцієнта інтенсивності напружень* (КІН). Визначення КІН здійснюють розрахунковими методами. Поле напружень у вершини тріщини має сингулярність виду $1/\sqrt{r}$, де r - відстань від вершини тріщини до точки, напруження в якій розглядаються (рис. 11.3). Іншими словами, КІН є мірою сингулярності напружень в околі тріщини. Розмірність КІН в системі СІ - Па $\sqrt{м}$.

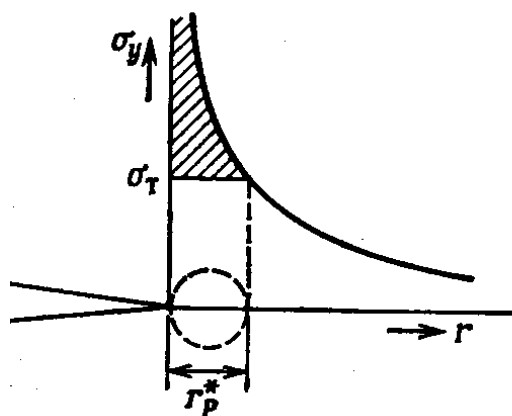


Рис. 11.3. Поле напружень у околі вершини тріщини.

Розрізняють наступні види КІН:

- K_I - коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини нормального відриву (тип I);
- K_{II} - коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини, береги якої зміщуються вздовж тріщини (тип II);
- K_{III} - коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини, береги якої зміщуються поперек тріщини (тип III);
- K_{th} - гранична інтенсивність напружень для тріщиноутворення (порогове значення).
- K_C - критичний коефіцієнт інтенсивності напружень - значення інтенсивності напружень, при якому розповсюдження тріщини стає швидкодіючим (в'язкість руйнування).

Якщо значення КІН є меншим за порогове ($K \leq K_{th}$), то тріщина не розвивається, якщо більшим – це є умовою її росту ($K > K_{th}$). У випадку, коли значення КІН перевищує критичний коефіцієнт інтенсивності напружень ($K > K_C$), то має місце неконтрольований ріст тріщини з катастрофічними наслідками.

В'язкість руйнування - це відносне збільшення механічних розтягуючих напружень у вершині тріщини при переході її від стабільної до нестабільної стадії росту. В'язкість руйнування тісно пов'язана з показниками міцності матеріалу. Збільшення міцності супроводжується зниженням пластичності і в'язкості руйнування.

Чим вища в'язкість руйнування, тим більше енергії необхідно для підростання тріщини. У пластичних матеріалах легше контролювати тріщини і вони є набагато менш небезпечними, в порівнянні з тріщинами у крихких матеріалах (рис. 11.4).

В'язкість руйнування матеріалів визначається за допомогою так званих компактних зразків. У визначених місцях до зразка прикладається зусилля P і визначається розкриття тріщини у її вершині (рис. 11.5).

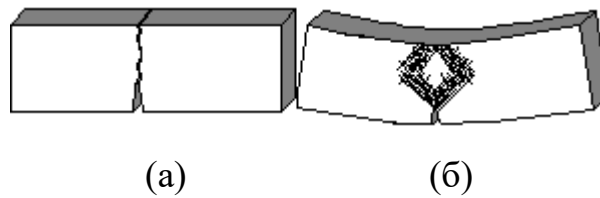


Рис. 11.4. Приклади крихкого (а) і в'язкого (б) руйнування.

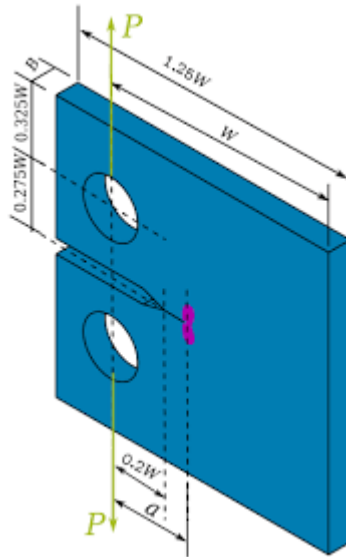


Рис. 11.5. Компактний зразок для визначення в'язкості руйнування.

11.3. Причини виникнення локального пошкодження типу тріщини у роторах турбін

Парова турбіна є складною механічною системою, яка експлуатується в умовах високих температур, а також дії значних статичних і динамічних навантажень. Значні запаси статичної та динамічної міцності, що закладаються на етапі конструювання турбіни, не можуть повною мірою запобігти виникненню пошкоджень конструктивних елементів турбіни, зумовлених головним чином пластичними деформаціями.

Потенційними причинами зародження тріщин у валах турбін є всі без винятку технологічні операції, що використовуються при їх виготовленні (поковка, токарна та фрезерна обробка, термічна обробка), оскільки вони супроводжуються пластичним деформуванням матеріалу. Крім того,

тріщиноутворення у валах турбіни обумовлено їх складною геометрією, тобто наявністю галтелей і виточок, які є концентраторами напружень і, тому, потенційними місцями зародження та росту тріщин втоми. Нарешті, через особливості роботи турбіни, пов'язані з значною кількістю теплових (періодичний нагрів і охолодження), збільшується вірогідність зародження тріщин термовтоми, зумовлених термічними напруженнями.

Розвиток втомного пошкодження умовно поділяють на два етапи. На першому, найбільш тривалому, етапі воно проявляється у вигляді пластичної деформації мікрооб'ємів матеріалу. Цей етап називають розсіяним втомним пошкодженням, тому що воно відносно рівномірно розподіляється по об'єму матеріалу. Його тривалість оцінюють у приблизно 90% загальної довговічності. Саме розсіяне втомне пошкодження розглядалось у попередній лекції.

Особливо інтенсивним таке пошкодження є при перехідних режимах роботи турбіни, тобто при пусках-зупинах (поперечні коливання) та при підключенні турбогенератора до мережі (крутильні коливання).

Розвиваючись тривалий період часу розсіяне втомне ушкодження локалізується у якомусь дефекті матеріалу і продовжує розвиватись як тріщина втоми. Вона відносно швидко досягає критичних розмірів і призводить до катастрофічних руйнувань. Процес розвитку локального пошкодження є відносно коротким і оцінюється приблизно у 10% загальної довговічності.

Поява навіть невеликої тріщини повністю змінює підхід до оцінки несівної здатності конструкції. Методи розрахунку, засновані на класичній механіці, не дозволяють оцінити напружено-деформований стан в околі тріщини. Закономірності росту тріщин можуть, хоч і не повною мірою, але з достатньою для практики точністю описуватися за допомогою підходів механіки руйнування. Складність завдання полягає в тому, що точність передбачення швидкості росту тріщини залежить від багатьох факторів, які необхідно враховувати, вплив яких можна визначити виключно експериментально. Серед них в'язкість руйнування матеріалу, кінетична діаграма росту тріщини,

температура, масштабний фактор, хімічно агресивне середовище та багато інших.

Тому для підвищення надійності роботи турбін та іншого теплоенергетичного обладнання необхідно використовувати підходи механіки руйнування до прогнозування процесу зростання тріщин в елементах конструкцій парових турбін у реальних умовах експлуатації.

11.4. Закономірності розвитку тріщини в елементах конструкцій

Обстеження парових турбін під час планових ремонтів виявляють на поверхні тріщини різної глибини та протяжності. Інструкцією з експлуатації турбін допускається наявність тріщин завглибшки до 1 мм. Під час капітального ремонту тріщини більшої глибини видаляють токарною обробкою поверхні на глибину тріщини.

Оцінка кінетики росту тріщини в роторі, що обертається, спирається на вирішенні задачі про вимушені коливання ротора з урахуванням демпфування. Як модельний об'єкт розглядається ротор високого тиску парової турбіни К-200-130 потужністю 200 МВт (рис. 9.6, S1 і S2 – опори) діаметром D і довжиною L .

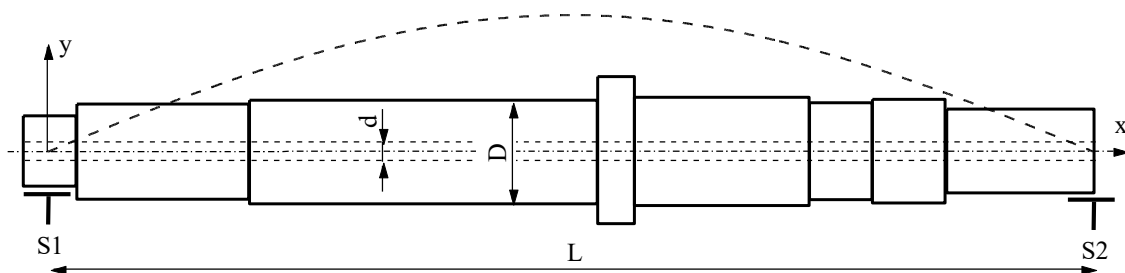


Рис. 11.6. Ротор високого тиску турбіни К-200-130.

Однією з причин зародження тріщин на поверхні валу турбіни є дії термічних напружень в місцях концентрації напружень при пуску турбіни. При проходженні через критичну швидкість обертання валу амплітуда його коливань зростає до значень, за яких тріщина продовжує своє зростання, яке можна описати рівнянням Періса

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^n,$$

де a – глибина тріщини, N – кількість циклів навантаження, C і n – емпіричні параметри, ΔK_I – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), який змінюється в діапазоні від ΔK_{Ith} (порогове значення) до ΔK_{Ic} (критичне значення).

На рис. 11.7 показні кінетичні діаграми росту тріщини для роторної сталі при нормальній і підвищеній температурі. Як видно, збільшення робочої температури призводить до зростання тріщиностійкості.

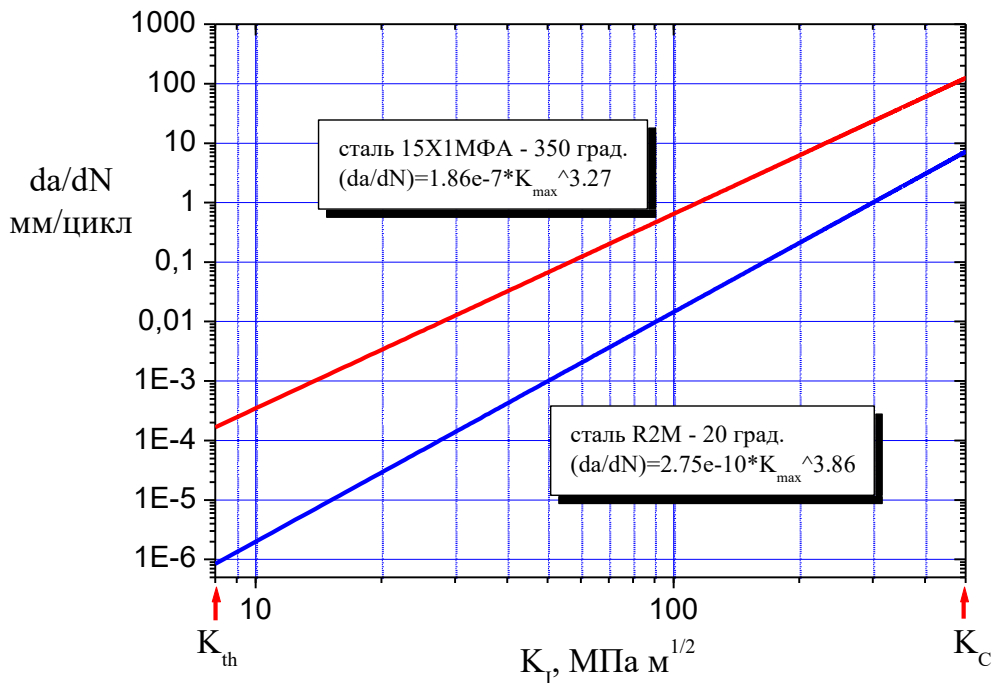


Рис. 11.7. Кінематична діаграма росту тріщини для роторної сталі.

Орієнтація тріщини щодо фази коливань може бути довільною. На рис. 11.8 показані крайні випадки, коли тріщина знаходиться в області розтягуючих (рис. 11.8, а) і стискаючих напружень (рис. 11.8, б). Можливі безліч проміжних положень тріщини, у яких її розвиток передбачити дуже складно.

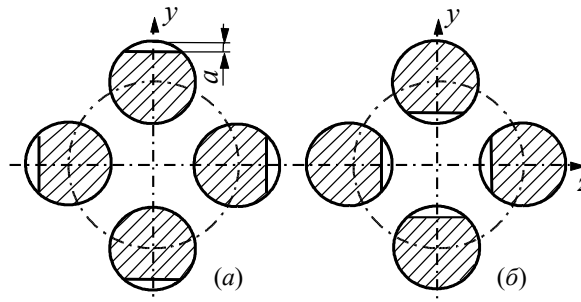


Рис. 11.8. Можливі орієнтації тріщини при обертанні ротора.

Найгірший сценарій орієнтації тріщини при коливанні ротора показаний на рис. 11.8 а. В цьому випадку КІН для крайової тріщини з прямим фронтом визначається рівнянням

$$K_I = \sigma_c \sqrt{\pi a} (1,1105 - 2,6475\gamma + 5,6875\gamma^2),$$

де σ_c – напруження в перетині з тріщиною, $\gamma = a/D$. Розвиток тріщини розглядається у найбільш напруженому перерізі валу при коливаннях за першою формою, тобто посередині ($L_c = L/2$).

Один оберт валу розглядається як один цикл навантаження. Кутова швидкість обертання прискорення або сповільнення з кутовим прискоренням A валу на N -тому обороті визначається формулою

$$\omega_N = \sqrt{\beta N A},$$

де $\beta = 4\pi$ якщо прискорення A задається в рад/с², $\beta = 2$, якщо в об/с².

Передбачається, що на поверхні валу утворилася тріщина глибиною 1 мм, яка є максимально допустимою згідно з інструкцією з безпечної експлуатації турбіни. Такі тріщини виявляють під час обстеження валу на етапі капітального ремонту, коли турбіна перебуває у повністю розібраному стані. Назвемо її початковою тріщиною a_0 . При заданому кутовому прискоренні визначається кутова швидкість обертання валу на кожному з N обертів та амплітуда напружень у перерізі з тріщиною та відповідне значення КІН.

При наближенні до першої критичної швидкості обертання валу ($m=1$) амплітуда напружень та КІН зростає. При цьому K_I постійно порівнюється з

ΔK_{Ith} . Виконання умови $K_I \geq \Delta K_{Ith}$ означає, що тріщина за один цикл навантаження підростає на величину a_{N_1} і стає рівною

$$a_{N_1} = a_0 + da_{N_1}.$$

На наступному циклі навантаження розрахунок ведеться з урахуванням розміру тріщини, що змінився, а саме

$$a_{N_2} = a_{N_1} + da_{N_2},$$

і так далі. В загальному випадку

$$a_{N_d} = \sum_{d=1} (a_{N_{d-1}} + da_{N_d}),$$

де $N_1, N_2 \dots N_d$ – пошкоджуючі цикли навантаження (рис. 11.9).

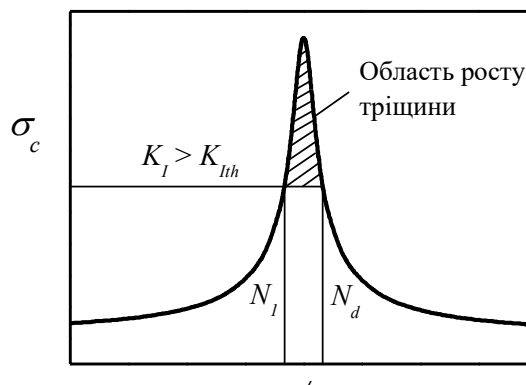


Рис. 11.9. Схема визначення області росту тріщини на резонансній кривій.

Процес триває до тих пір, поки кількість пусків і зупинок турбіни в сумі не досягне 4000, або виконається умова $K_I \geq \Delta K_{Ic}$, яка, по суті, означає втрату конструкцією несівної здатності. Тут враховується, що кількість пусків турбіни $S=2000$. Оскільки вал турбіни проходить через резонанс як при пуску, так і при зупинці турбіни, кількість проходжень через резонанс прийнято рівним подвоєному числу пусків.

Таким чином, можна оцінити вплив кожного експлуатаційного фактора та ступінь його небезпеки, а також оцінити ризики критичного зростання тріщини для конкретної турбіни за наявності даних про вібраційні характеристики.

Складність завдання оцінки тріщиностійкості валу турбіни полягає у наявності широкого спектра факторів, від яких вона залежить. Серед них в'язкість руйнування сталі та її залежність від температури та інших

експлуатаційних факторів, тип тріщини та вид її деформування, напруженість перерізу з тріщиною та багато інших. Враховуючи недоступність чи суперечливість даних про властивості роторної сталі, розрахунок зазвичай проводять у певному правдоподібному діапазоні їх значень.

Розрахунки, результати яких наведені нижче, виконані на основі залежності швидкості зростання тріщини від розмаху КІН для роторної сталі. Вона апроксимується рівнянням Періса з параметрами $C=2,75 \cdot 10^{-10}$, $n=3,86$ (при цих параметрах тріщина вимірюється в мм). Характеристика демпфування, що істотно впливає на амплітуду резонансних коливань, змінювалась у діапазоні $\delta=0,03 \dots 0,07$. Значення декременту коливань, що визначає нижню межу цього діапазону, близьке до якості роторних сталей, а верхня – гіпотетично враховує, крім того, вплив конструкційного демпфування. Діаметр валу змінювався в діапазоні $D=0,44 \dots 0,84$ м. Довжина валу була $L=4,5$ м та густина сталі $\rho=7800$ кг/м³.

При пуску турбіни кутове прискорення змінюється у широкому діапазоні. У моделі при розрахунках кутове прискорення фіксувалося однією зі значень з діапазону $A=0,01 \dots 1$ об/с². Ця ідеалізація дозволяє виявити вплив кутового прискорення на швидкість росту тріщини у чистому вигляді.

Рис. 11.10 ілюструє процес розвитку тріщини при багаторазовому проходженні ротора через першу критичну частоту (у даному випадку $f_1=29,9$ Гц, що відповідає першій критичній швидкості реального ротора) з різним кутовим прискоренням. Очевидно, що чим вище кутове прискорення, тим менше пошкоджуючих циклів виникає при проходженні через резонанс і тим більше пусків допускає ротор, перш ніж тріщина досягне критичного розміру. Як видно, швидкість росту тріщини суттєво зростає на останній стадії її розвитку. Тому існує невелике вікно можливостей для виявлення тріщини до того, як вона стане нестабільною та виникне небезпека руйнування.

Оскільки дані щодо впливу експлуатаційних факторів (зокрема – температури) на характеристики K_{Ith} і K_{Ic} суперечливі або недоступні, розрахунок

закономірності зростання тріщини був виконаний у широкому діапазоні їх зміни. Як видно із рис. 11.11 вплив K_{Ith} на інтенсивність росту тріщини починає проявлятися починаючи з деякого його значення, яке практично не залежить від величини K_{Ic} в діапазоні його значень $K_{Ic}=100 \dots 500$ МПа м^{1/2}. У той же час, вплив K_{Ic} у дослідженому діапазоні практично не виявляється (рис. 11.12). На цих та наступних рисунках інтенсивність зростання тріщини характеризується кількістю пусків S , при якому тріщина досягає критичного значення.

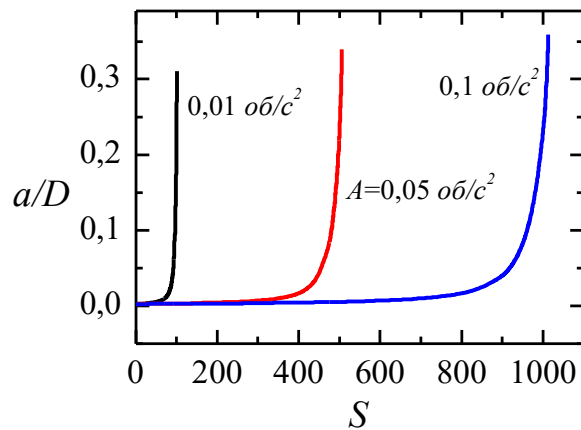


Рис. 11.10. Ріст тріщини в роторі в залежності від кількості пусків при різному кутовому прискоренні.

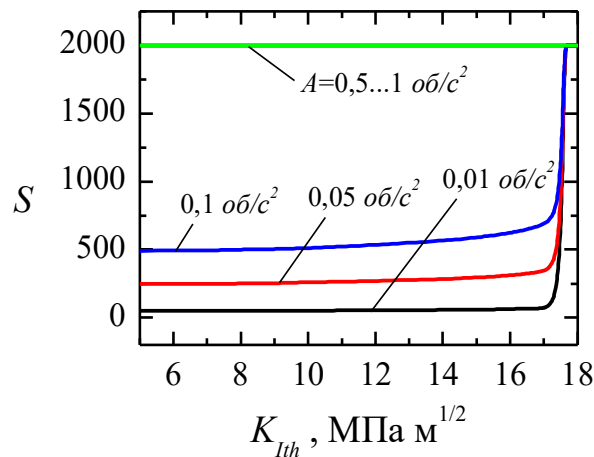


Рис. 11.11. Кількість пусків як функція K_{Ith} .

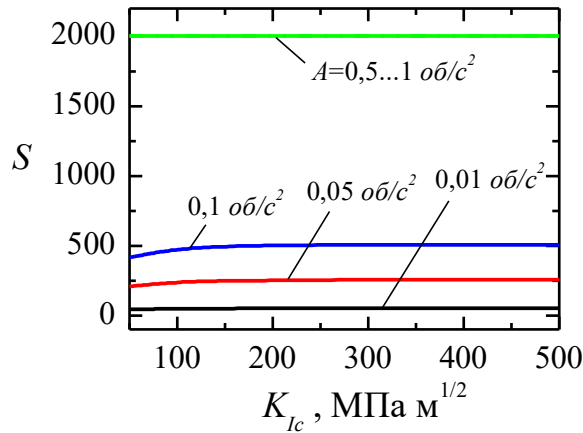


Рис. 11.12. Кількість пусків як функція K_{Ic} .

Збільшення рівня демпфування істотно знижує амплітуду резонансних коливань і, отже, кількість пошкоджуючих циклів коливань. Як видно із рис. 11.13, вплив демпфування на кількість пусків ротора істотно проявляється лише при відносно малих кутових прискореннях. Загалом існує рівень демпфування (у нашому випадку це $\delta \approx 0,053$), коли зникають умови для росту тріщини. У той самий час слід зазначити, що у даний час питання про реальні рівні демпфування поперечних коливань валу турбіни залишається відкритим.

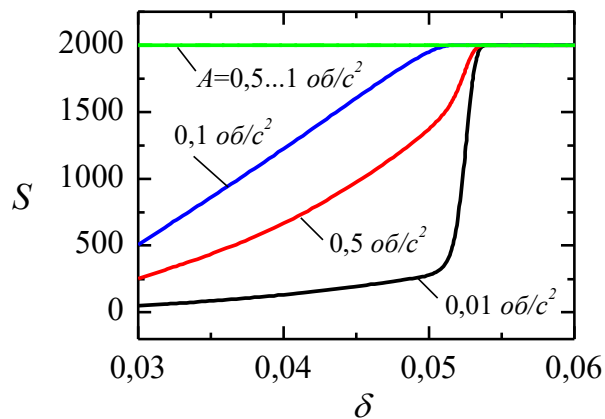


Рис. 11.13. Кількість пусків як функція δ .

Збільшення критичної частоти обертання ротора f_l однозначно призводить до інтенсифікації росту тріщини та, відповідно, до зниження кількості пусків (рис. 11.14). Для збереження масових та геометричних характеристик ротора

зміна критичної частоти його обертання досягалася варіюванням модуля пружності роторної сталі.

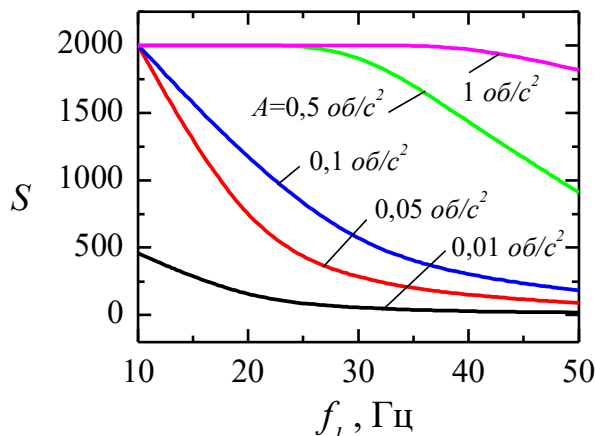


Рис. 11.14. Кількість пусків як функція частоти.

Збільшення діаметра ротора при інших рівних умовах знижує рівень напружень в перетині з тріщиною і тим самим збільшує довговічність ротора (рис. 11.15). Постійність критичної частоти досягалось варіюванням модуля пружності.

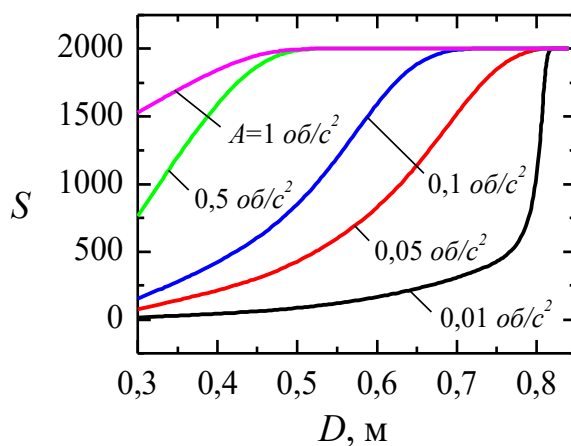


Рис. 11.15. Кількість пусків як функція діаметра ротора.

Ці результати дозволяють зробити якісний порівняльний аналіз впливу різних факторів на процес розвитку тріщини в роторі, що обертається, при перехідних процесах, що мають місце під час пуску і зупинки турбіни і оцінити їх вплив на надійність турбіни.

Частиною цих факторів можна варіювати у відносно широкому діапазоні, а саме кутовим прискоренням, резонансною частотою, геометричними характеристиками. Саме ці фактори мають найбільший вплив на ріст тріщини. Можна виключити можливість розвитку тріщини і, отже, підвищити надійність турбіни, за рахунок збільшення кутового прискорення та/або діаметра ротора та зменшення резонансної частоти.

Частина характеристик практично не піддається варіюванню, оскільки є властивістю матеріалу (декремент коливань, K_{Ith} і K_{Ic}). З них найбільший вплив на ріст тріщини має характеристика демпфування. Високе демпфування знижує або повністю виключає можливість появи пошкоджуючих циклів навантаження. Використовувані в даний час роторні сталі не мають достатньо високих характеристик демпфування. Створення таких сталей, а також ефективних демпферів коливань є перспективним способом запобігання виникненню умов для росту тріщин та підвищення надійності турбін.

Контрольні запитання

1. Для дослідження яких пошкоджень використовується механіка руйнування?
2. Якими є характеристики тріщиностійкості?
3. Що характеризує в'язкість руйнування?
4. Які чинники пришвидшують ріст тріщини у роторах турбіни?
5. Які чинники гальмують ріст тріщини у роторах турбіни?
6. Від чого залежить коефіцієнт інтенсивності напружень?

12. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ ВІБРАЦІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПОШКОДЖЕНЬ

12.1. Загальне поняття про вібродіагностику

Існує умовний поділ методів діагностики пошкодження на локальні і інтегральні.

Локальні методи діагностики дозволяють виявити дефект за рахунок обстеження всього об'єкта діагностики за допомогою таких методів, як візуальний, рентгеноскопічний, ультразвуковий тощо. Такий підхід дозволяє виявляти дефекти різного розміру, визначати їхні параметри, але вимагають значного часу, доступу до поверхні об'єкта діагностики і кваліфікованого персоналу.

Інтегральні методи дозволяють оцінити стан об'єкта діагностики в цілому на основі короткочасних тестів всієї конструкції. До інтегральних методів діагностики відносять вібраційні методи, в основі яких лежить взаємозв'язок між параметрами дефекту (тип, розмір, місцеположення) і вібраційними характеристиками (власні частоти і форми коливань, спектр коливань тощо).

Значну частину обладнання електричних станцій складає обертове обладнання, до якого можна віднести турбінне, насосне, тягодуттєве та компресорне обладнання. Наявність підвищеної вібрації у обертового обладнання є порушенням його справного стану.

Вібраційні процеси поділяються на *стаціонарні* (постійні у часі) і *нестационарні* (перемінні часі). Стаціонарні процеси можуть бути періодичними, гармонічними та полігармонічними, а нестационарні - перехідними і випадковими.

Періодичні коливання – коливання, при яких кожне значення величини повторюється через рівні інтервали часу. Найпростіший випадок періодичних

коливань – гармонічні коливання (рис. 12.1). Ці коливання можуть бути описані за законом синуса, або косинуса.

$$X(t) = A \sin (\omega t + \varphi),$$

де A – амплітуда коливань; ω – кутова швидкість; φ – початкова фаза коливань.

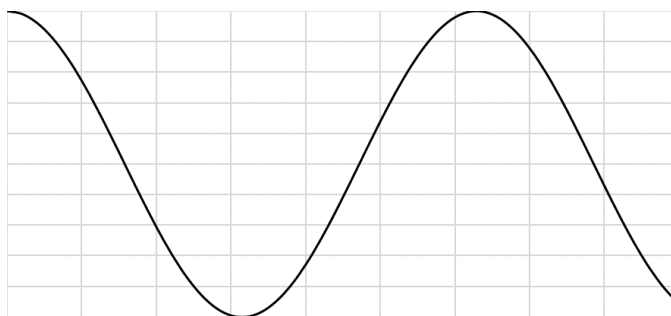


Рис. 12.1. Зміна параметру у часі за гармонічного коливання.

Полігармонічні коливання можуть бути представлені у вигляді суми двох та більше гармонічних кривих (гармонік), при цьому частоти гармонік кратні основній частоті. Приклад полігармонічної кривої побудованої на базі трьох гармонічних кривих наведено на рис. 12.2.

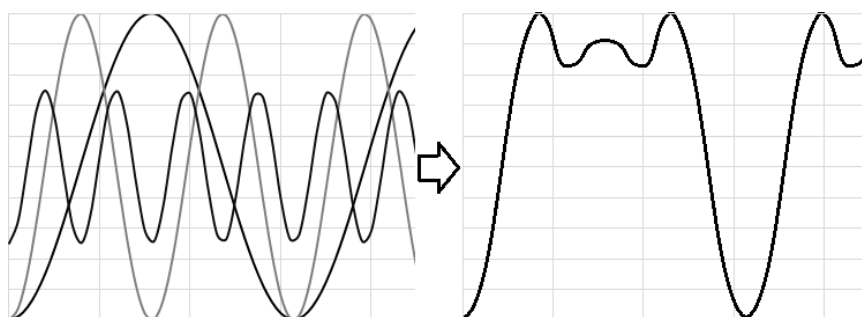


Рис. 12.2. Результуюча полігармонічна крива побудована на основі трьох гармонік.

Випадкові процеси непередбачувані за своїми параметрами (амплітуда, кутова швидкість), однак вони зберігають свої статистичні характеристики (середні значення, дисперсія) протягом усього процесу діагностування. Прикладом випадкового процесу може бути шум працюючого двигуна.

Нестационарні процеси можна поділити на короточасні та безперервні. Ймовірнісні характеристики таких процесів є функціями часу. Наприклад: ударні процеси, поява пошкоджень або тріщин під час роботи.

12.2. Вібраційні складові та причини їхньої появи

З точки зору вібраційних процесів, для кращого розуміння причин їхньої появи, слід ввести поняття ідеальної машини. В ній уся енергія перетворюється в корисну роботу.

В реальному ж механізмі, вібрації – побічне явище, що виникає від взаємодії елементів машини. Значення вібрації визначає ступінь пошкодження нормальної передачі динамічних сил через механічну систему. Характерною особливістю нормально функціонуючої машини є низький рівень вібрації.

Важливе значення при встановленні причин вібрації є напрямок вимірювання. Регламентовано проводити вимірювання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (рис. 12.3): вертикальному (vertical 1V-2V), горизонтальному (horizontal 1H-2H) та осьовому (axial 1A-2A). За нормального режиму роботи механізмів роторного типу, осьова складова вібрації має мінімальне значення, а горизонтальна – максимальне.

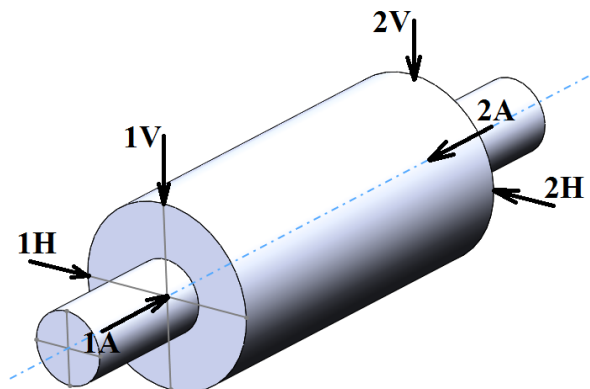


Рис. 12.3. Основні напрями для вимірювання вібрації.

Основною причиною появи вібрації слід вважати появу невірноваженості обертального елемента – валу, дисків, робочих органів, зношення підшипників.

Відцентрова сила, яка зумовлює механічні коливання, має радіальний напрямок. Однак жорсткість механізму у вертикальному напрямі зазвичай вища, ніж в горизонтальному. Відповідно вертикальна складова вібрації менша за горизонтальну. Оскільки головною задачею механізму є реалізація обертального руху, то для осевого руху об'єкт не призначений. Тому осьова складова вібрації повинна мати найменше значення. Збільшення осевої складової може бути пов'язане з появою додаткового ступеня свободи, або з дією дефектів, що провокують динамічні сили в осьовому напрямі.

Ці основні наслідки дозволяють сформулювати ознаки та причини появи можливих дефектів. Приклад такого причинно-наслідкового зв'язку для корпусу підшипника наведено на рис. 12.4.



Рис. 12.4. Причинно-наслідкові зв'язки появи вібрації у корпусі підшипника.

Збільшення вібрації переважно у вертикальному напрямі викликається появою тріщин в опорах або основі, низькою жорсткістю основи, послабленням з'єднань. Підвищена горизонтальна складова вібрації визначається дисбалансом ротора, зношенням підшипників, послабленням посадки підшипників. Підвищення осевої складової вібраційних процесів виникає при порушенні центрування валів, дефектах муфт і неправильному монтажі або регулюванні підшипників.

12.3. Загальна ідея вібраційної діагностики

Як було зазначено вище, коливання механічної системи характеризується власною частотою і формою коливань. На рис. 12.5 наведено коливальні системи з одним ступенем вільності. Якщо таку систему відхилити від положення рівноваги, то маса почне здійснювати періодичні рухи, які називають вільними коливаннями, а їхні частоти називають власними частотами. Кількість власних частот дорівнює кількості ступеней вільності механічної системи.

У разі, коли властивості системи не змінюються, незмінними залишаються також власні частоти і форми коливань.

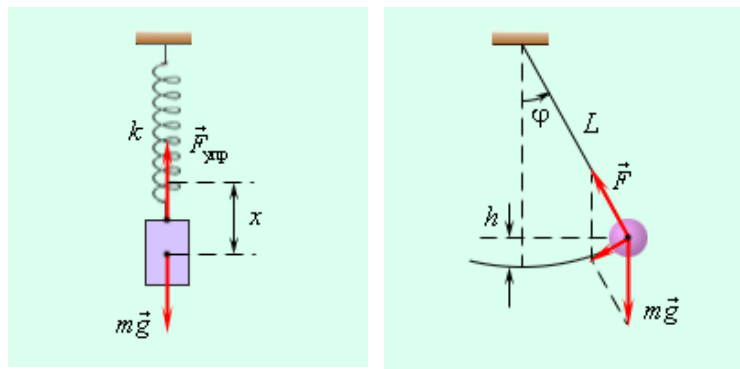


Рис. 12.5. Коливальні системи з одним ступенем вільності.

Але уявімо собі, що в системі щось сталося. Наприклад, змінилася її маса, жорсткість або демпфірування. Очевидно, що результатом цієї зміни буде зміна амплітуди і частоти коливань (рис. 12.6).

Однією з можливих причин зміни властивостей механічної системи є її пошкодження, наприклад, виникнення тріщини в томи, руйнування деяких елементів конструкції, ослаблення кріплення, які змінюють жорсткість системи, а в деяких випадках і демпфірування.

Загальна ідея вібраційної діагностики пошкодження базується на зв'язку між пошкодженням системи і параметрами вібрації. Уявімо, що ми спостерігаємо за параметрами вібрації в процесі експлуатації конструкції. Якщо ці параметри залишаються стабільними у нас немає підстав підозрювати

наявність проблем. Але якщо раптом ми помітили, що, наприклад, власні або резонансні частоти конструкції змінилися (рис. 12.7), це означає, що в ній виникли проблеми, природу яких необхідно з'ясувати.

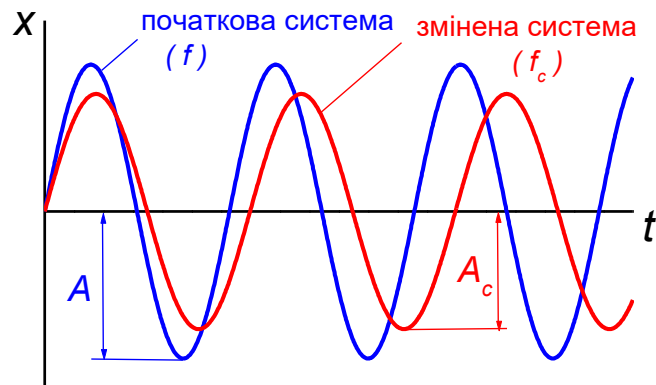


Рис. 12.6. Процес зміни вібраційних характеристик внаслідок зміни параметрів коливальної системи.

Ідея вібраційної діагностики є досить очевидною і простою. Через те вона має велику історію. Наприклад, простукування молоточком колісних пар, перевірка цілісності кришталевого посуду. Такий метод діагностики став прообразом сучасних методів дослідження за допомогою ударного тесту.

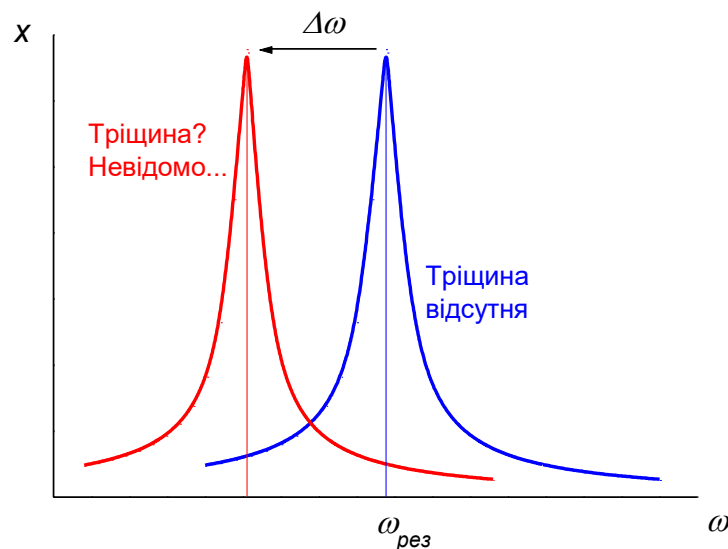


Рис. 12.7. Вплив дефектів різного типу на резонансну частоту коливальної системи.

Виникнення тріщини в цих випадках призводить до зниження амплітуди коливань внаслідок інтенсивного поглинання їх енергії тріщиною. Тому звук стає глухим. У цьому випадку навіть немає необхідності в спеціальному обладнанні для аналізу коливань. Досить мати практичний досвід і хороший слух.

Інший приклад: прослуховування серця. Здорове серце коливається не так, як хворе. Сучасні методи аналізу коливань серця дозволяють виявити найменші проблеми в його роботі.

В даний час розроблено багато вібраційних методів діагностики пошкодження. Кожен з них має свої переваги і недоліки.

12.4. Власні частоти коливань

Перші роботи з впливу локальних дефектів на вібраційні характеристики елементів конструкції були виконані в сорокових роках минулого століття П.Г. Кірмшером та В.Т. Томсоном.

Оскільки тріщина змінює жорсткість тіла, модель тріщини повинна відображати цю зміну. На рис. 12.8 показано генезис розвитку моделей тріщини. Найбільш проста модель - це виріз. Різні автори пропонували різну форму вирізу - прямокутна, квадратна, трикутна. Проблема такого підходу - зменшення маси системи, чого не відбувається в разі реальної тріщини. Незвичайний спосіб моделювання тріщини запропонували Thomson і Петроски. Вплив тріщини на піддатливість системи вони змоделивали додатковою парою згинальних моментів. Тріщина змінює напружено-деформований стан в її околиці. Крістітес і Барр запропонували враховувати цю зміну за допомогою досить складної функції. Але найбільш використовувана в даний час модель тріщини це її подання до вигляді пружного шарніра, податливість якого визначається методами лінійної механіки руйнування.

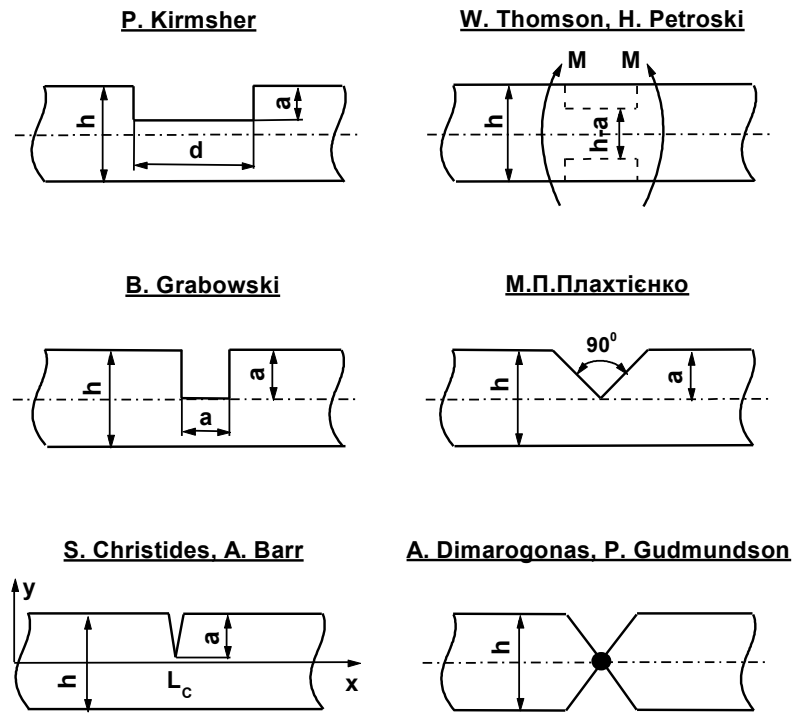


Рис. 12.8. Моделі тріщини.

Зазвичай в задачах про коливання тіл з тріщиною розглядають так звану відкриту тріщину і тріщину, що періодично закривається. Вважається, що відкрита тріщина не змінює свого стану при коливаннях. Такий випадок може мати місце, наприклад, у разі наявності значної статичного навантаження, яка не дозволяє тріщині закриватися (наприклад, крило літака під дією власної ваги). Таким чином жорсткість системи зменшується, але характеристика відновлювальної сили R залишається лінійною (рис. 12.9). Тому в разі відкритої тріщини ми залишаємося в рамках лінійної теорії коливань, що дозволяє отримувати відносно прості рішення задачі.

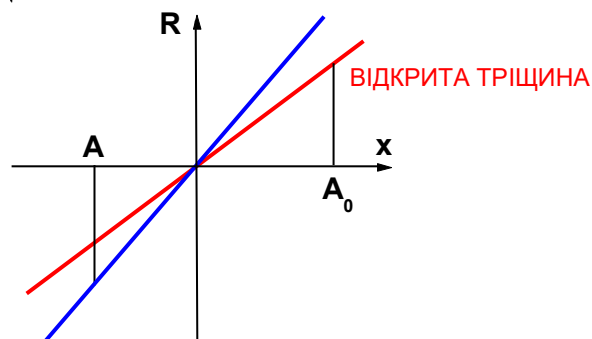


Рис. 12.9. Пружна характеристика тіла з відкритою тріщиною.

Тріщина, що закривається, змінює свій стан в процесі коливань, періодично змінюючи жорсткість системи (рис. 12.10). При цьому вважається, що жорсткість тіла із закритою тріщиною одно жорсткості неушкодженого тіла. Злам на характеристиці відновлювальної сили характеризує момент зміни стану тріщини (відкрита або закрита).

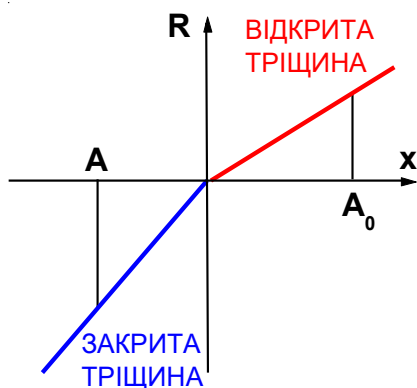


Рис. 12.10. Пружна характеристика тіла з тріщиною, що закривається.

Незважаючи на простоту цієї характеристики, вона призводить до суттєвої нелінійності коливальні системи. Поведінка такої системи набагато складніше, ніж лінійної. Рішення завдання про коливання такої системи також є набагато більш складним.

Визначення піддатливості перетину з тріщиною є однією з головних проблем моделювання коливань пошкодженого тіла. Найбільш популярними є моделі, в яких зміна піддатливості тіла в результаті виникнення тріщини визначається на підставі підходів механіки руйнування.

Підхід є досить простим, він заснований на балансі енергій. З одного боку додаткова енергія деформації визначається через зміну піддатливості перетину з тріщиною методами класичної механіки, а з іншого - через так званий коефіцієнт інтенсивності напружень. Цей коефіцієнт є основним предметом досліджень в рамках механіки руйнування.

Такий підхід дозволяє отримати досить просту формулу для зміни піддатливості для консольного стрижня з крайовою тріщиною нормального відриву, а саме

$$\delta_o(\gamma) = \frac{8,82 \left[(1-\gamma)^6 - 3(1-\gamma)^2 + 2 \right]}{(1-\gamma)^2 b h^2 E};$$

де γ - відносна глибина тріщини.

Вплив параметрів тріщини демонструється на прикладі консольного стрижня з крайовою поперечною тріщиною, розташованої біля зацмлення. Це перша форма коливань (рис. 12.11).

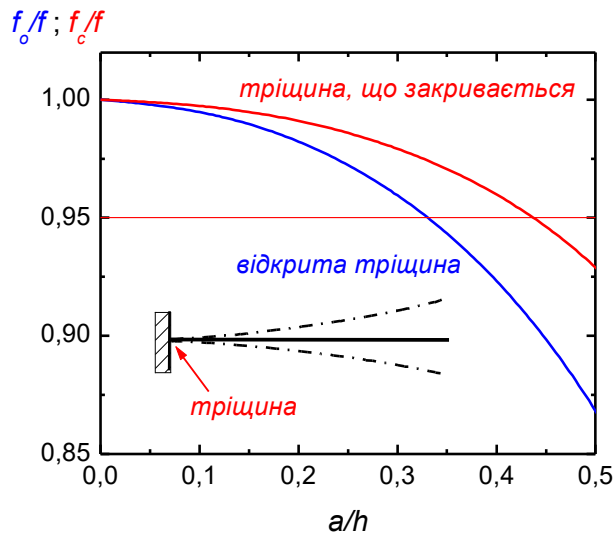


Рис. 12.11. Залежність власної частоти першої форми коливань консольного стержня від відносної глибини тріщини.

Як видно з цього рисунку, відкрита тріщина змінює власну частоту більш суттєво, ніж тріщина, що закривається. Тому моделі тріщини у вигляді вирізу не завжди придатні для моделювання тріщин в томи.

Привабливість вібродіагностики, заснованої на власних частотах коливань, полягає в її відносній простоті. Давно розроблені і використовуються системи визначення власних частот системи методом удару, наприклад, фірми Брюль і К'єр (рис. 12.12).

Разом з тим, така вібродіагностика не завжди демонструє достатньо високу чутливість для виявлення тріщин докритичного розміру.

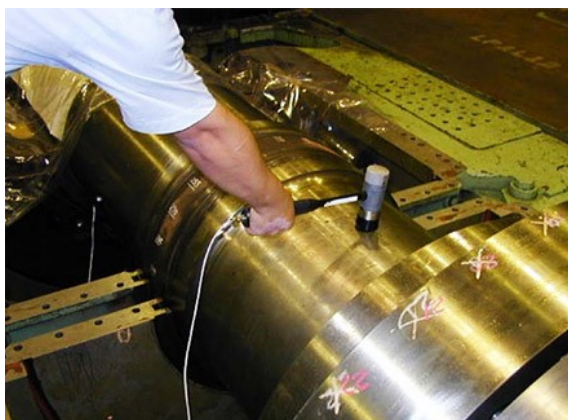


Рис. 12.12. Ударний тест для визначення власних частот і форм коливань великогабаритної конструкції.

12.5. Характеристики демпфірування

Характеристики демпфування коливань характеризують здатність матеріалу або конструкції поглинати енергію коливань. Особливо актуальною характеристика демпфування є при резонансних коливаннях, амплітуда яких є прямо пропорційною змушувальній силі, але обернено пропорційною характеристиці демпфірування

Втомні випробування матеріалів або конструкцій зазвичай проводяться при резонансних коливаннях зразків. В певний момент амплітуда коливань починає зменшуватися, оскільки в зразку з'явилася тріщина. При цьому зменшується власна частота, але також збільшується демпфірування. Тріщина інтенсивно поглинає енергію коливань. Рис. 12.13 демонструє вплив рівня поглинання енергії механічних коливань на амплітуду резонансних коливань системи.

Тріщина втоми також має властивість суттєво поглинати енергію коливань. Саме тому при виникненні тріщини в колісній парі і в кришталевому бокалі звук стає глухим. Інтенсивність звуку зменшується через збільшення демпфування.

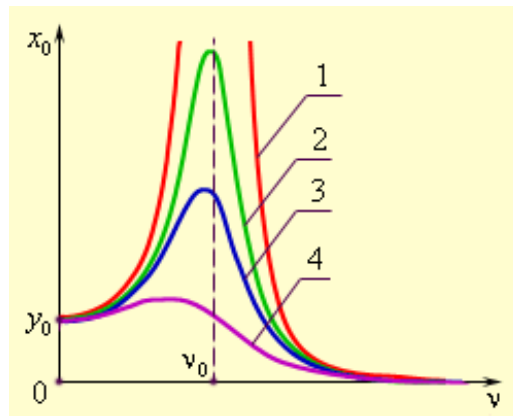


Рис. 12.13. Резонансні криві у випадку малого (1) середнього (2, 3) і великого (4) демпфірування коливань в системі.

Існує дві теорії, що пояснюють поглинання енергії коливань тріщиною. Перша пов'язує втрати енергії з пластичною зоною, що виникає в вершині тріщини, а друга - з тертям берегів тріщини (рис. 12.14). Береги тріщини є досить шорсткими і тертя між ними призводить до поглинання енергії механічних коливань.

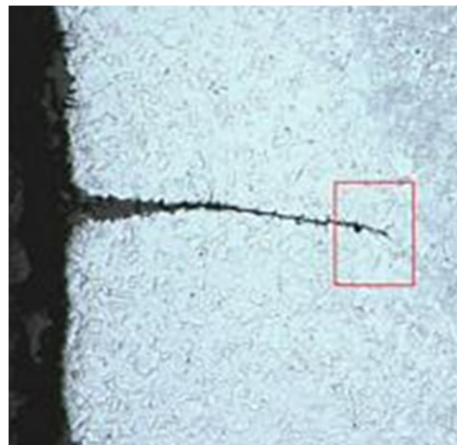


Рис. 12.14. Тріщина втоми.

Однак, незалежно від того, якими причинами викликано поглинання енергії тріщиною, характеристики демпфування коливань є чутливими до наявності тріщини втоми. На рис. 12.15 продемонстровано вплив тріщини втоми на декремент коливань лопатки турбіни з титанового сплаву з поверхневою тріщиною. Як видно, відносно невелика тріщина довжиною менше 10 мм і глибиною до 1 мм зумовлює суттєво збільшення характеристики демпфірування.

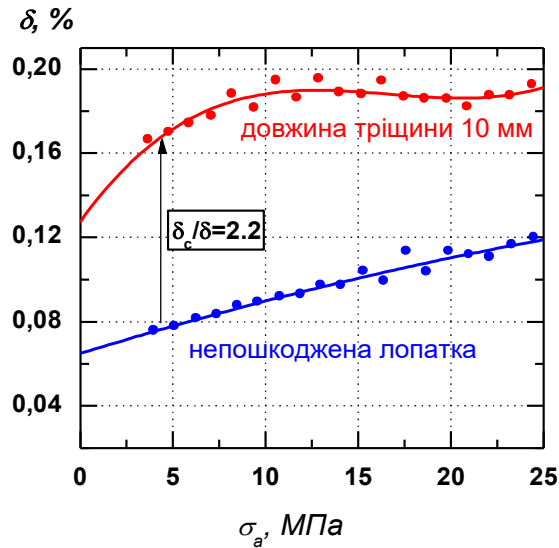


Рис. 12.15. Вплив тріщини втоми на характеристику демпфірування коливань лопатки ГТД.

Таким чином, зміна демпфування коливань тіла є чутливим індикатором пошкодження.

12.6. Нелінійні ефекти

Колівальна система стає нелінійною, якщо параметри системи змінюються нелінійно. Наприклад, система нелінійна, якщо демпфування нелінійно залежить від амплітуди або частоти. Або якщо має місце геометрична нелінійність, коли ми не можемо знехтувати деформацією системи внаслідок їх значущості.

Для вібродіагностики важлива нелінійність, пов'язана з процесом відкриття і закриття тріщини, який періодично змінює жорсткість системи. Цей процес, як було показано вище, можна змоделювати модифікацією пружною відновлювальної сили. Її можна представити однією монотонною функцією такого виду або двома лінійними функціями (рис. 12.16).

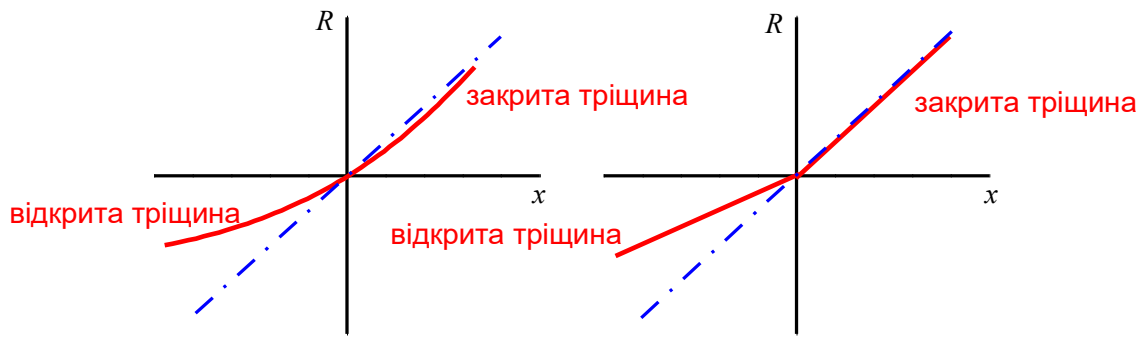


Рис. 12.16. Моделювання процесу відкриття-закриття тріщини.

У першому випадку відновлює сила апроксимується нелінійною функцією, а рух системи описується одним нелінійним диференціальним рівнянням. У другому випадку рух системи описується двома лінійними рівняннями, в яких різна жорсткість системи. Проблемним тут є визначення моменту часу, коли змінюється жорсткість системи, тобто коли потрібно використовувати перше або друге рівняння.

Існують методи приблизного аналітичного вирішення цих задач, наприклад метод гармонічного балансу. Однак найчастіше рішення таких істотно нелінійних проблем виконується з використанням тих чи інших чисельних методів.

12.7. Нелінійні ефекти при основному резонансі

При основному резонансі лінійної системи коливання є гармонічними. Тріщина втомлює зменшує власну частоту, збільшує демпфування, результатом чого є зменшення амплітуди коливань.

Однак тут проявляється ще одна особливість коливань, характерну для нелінійних систем, а саме спотворення гармонічності коливань (рис. 12.17). Кількісна оцінка цього спотворення здійснюється на основі спектрального аналізу коливань за допомогою розкладання функції в ряд Фур'є

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega + \phi_k) .$$

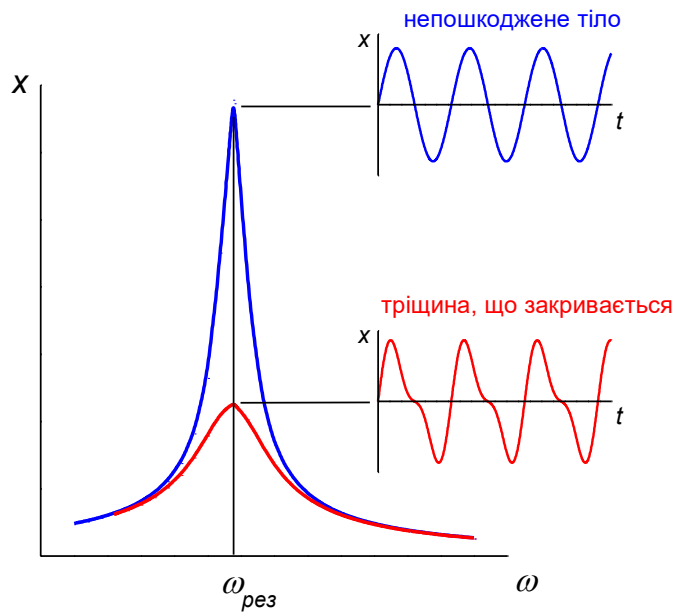


Рис. 12.17. Спотворення коливань тіла з тріщиною втоми при основному резонансі.

Як показали численні аналітичні та експериментальні дослідження тріщина, що закривається, найбільше впливає на нульовий коефіцієнт і другу гармоніку спектра. Тому таку нелінійність коливань зазвичай характеризують відношенням цих величин до амплітуди головної гармоніки.

Які коливальні процеси найкраще використовувати для вібродіагностики пошкодження: переміщення, швидкість, прискорення чи деформація? Як показали дослідження, найбільш чутливим до наявності закривається тріщини виявився спектр прискорення і деформації.

Дійсно нелінійність прискорення при резонансних коливаннях стержня з тріщиною, що закривається, в термінах другої гармоніки є набагато чутливішими до наявності тріщини, ніж нелінійність переміщення (рис. 12.18). В обох випадках нелінійність прямо залежить від розміру тріщини, однак на жаль є недостатньою для надійного виявлення навіть великих тріщин.

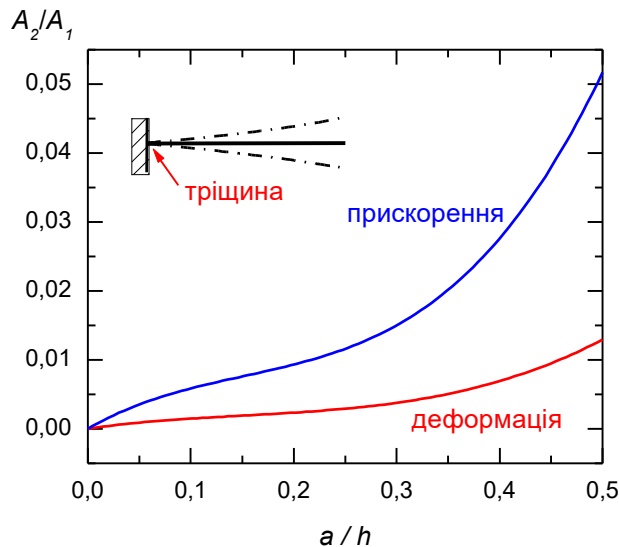


Рис. 12.18. Нелінійність прискорення і переміщення тіла з тріщиною втоми при основному резонансі.

Зміна нелінійності може бути використана для виявлення місця розташування тріщини. Якщо виконати вимір нелінійності, використовуючи сигнал з тензорезистров або акселерометрів, в різних точках стрижня і побудувати графік зміни нелінійності уздовж стрижня, то ми побачимо різку зміну нелінійності, яка указує на місце розташування тріщини. Це демонструє потенційну можливість виявляти за допомогою нелінійності не тільки наявність тріщини, але і місце її розташування.

12.8. Нелінійні резонанси

Нелінійні коливальні системи мають ще одну відмінність від лінійних систем. Вони мають не тільки головний резонанс, але ряд інших резонансів, які називають нелінійними. Ті які лежать нижче основного резонансу називають супергармонічними порядку $3/2$, $1/2$ і т.д., а ті, які лежать вище - субгармонічними порядку $2/1$ і т.д. (рис. 12.19).

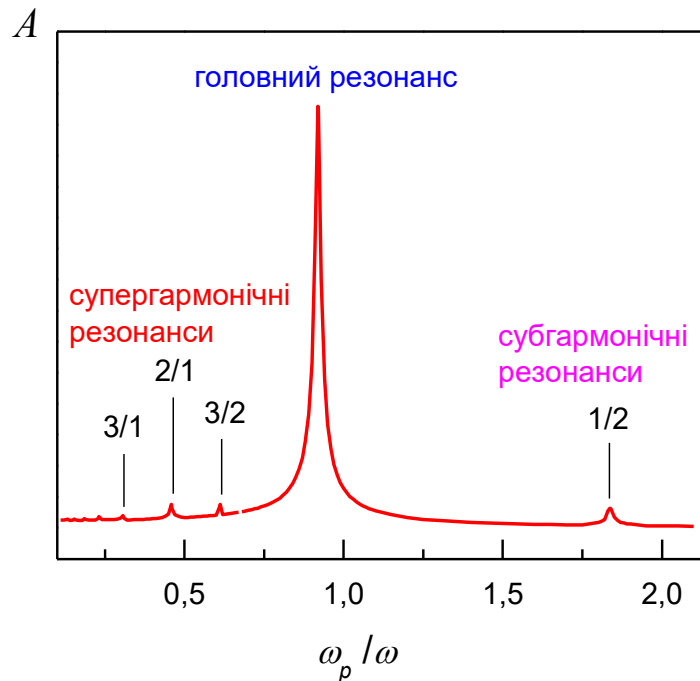


Рис. 12.19. Основний і нелінійні резонанси тіла з тріщиною втоми.

Амплітуди цих резонансів дуже маленькі, проте нелінійність коливань при цих частотах величезна. Навіть відносна мала тріщина в 20% площі поперечного перерізу викликає спотворення гармонійності коливань при суб і суперрезонансі настільки значне, що воно є очевидним навіть без спектрального аналізу. Ця нелінійність істотно залежить від розміру тріщини. Як і при основному резонансі, при нелінійних резонансах чутливість прискорення вище, ніж переміщення (рис. 12.20). Якісно ці залежності при основному і супергармонічному резонансі схожі. Однак, якщо порівняти рівні нелінійності в цих двох випадках, то виявиться, що при нелінійному резонансі вона на два порядки вище. А значить – вище і чутливість вібродіагностики.

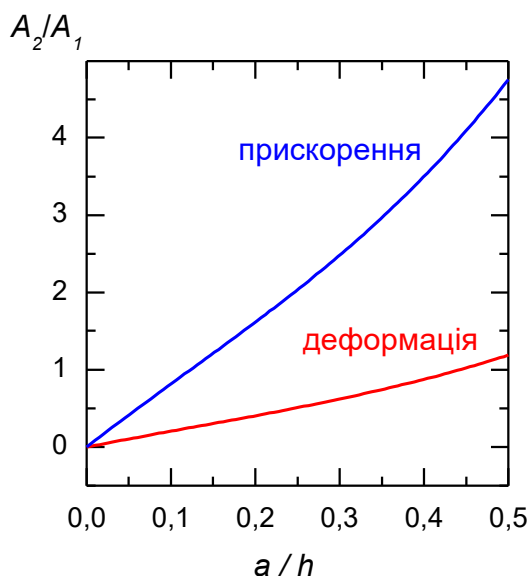


Рис. 12.20. Нелінійність прискорення і переміщення тіла з тріщиною втоми при супергармонічному резонансі порядку 1/2.

Нелінійні резонанси також дають можливість визначити місце розташування тріщини. Для цього гармонічна сила прикладається в різних точках тіла. Збуджується супер- або субгармонічний резонанс і проводиться спектральний аналіз коливань. Результируюча крива, що демонструє залежність рівня нелінійності коливань від точки прикладання зусиль, однозначно вказує на місце розташування тріщини.

Але амплітуди нелінійних резонансів, як і нелінійність коливань при цих резонансах, залежить від рівня демпфірування. Як видно (рис. 12.21), при дуже великому демпфуванні, яке оцінювалося в термінах логарифмічного декременту коливань, деякі нелінійні резонанси зникають.

Цей рисунок демонструє, що збільшення демпфування в три рази знижує нелінійність коливань при супергармонічному резонансі в кілька разів.

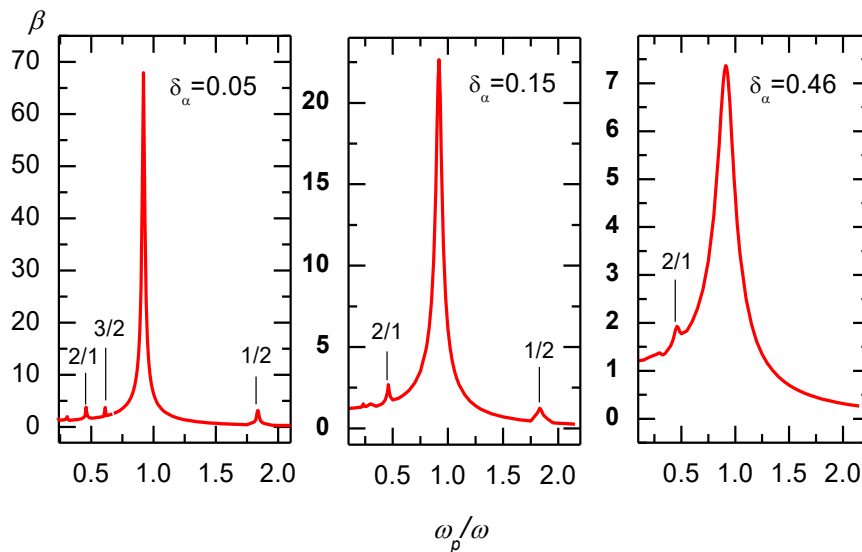


Рис. 12.21. Нелінійні резонанси при різному рівні демпфірування.

Як правило, від ідеї до її практичної реалізації пролягає дистанція величезного розміру. Перший етап реалізації ідеї – це лабораторний експеримент. В одній з лабораторій Ін-ту проблем міцності НАН України було створено оригінальну експериментальну установку (рис. 12.22). Коливання консольного зразка збуджували безконтактним способом за допомогою електромагнітів.

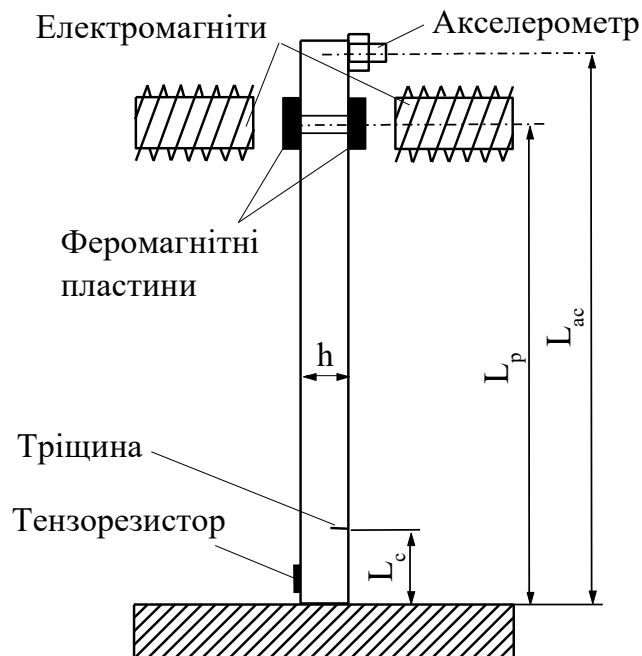


Рис. 12.22. Експериментальна установка для дослідження нелінійних ефектів.

Експерименти, проведені на цій установці, продемонстрували можливість використання супергармонічного резонансу для організації високочутливої вібродіагностики пошкодження типу тріщини втоми (рис. 12.23). Криві з точками – це експеримент, без точок – результати розрахунку.

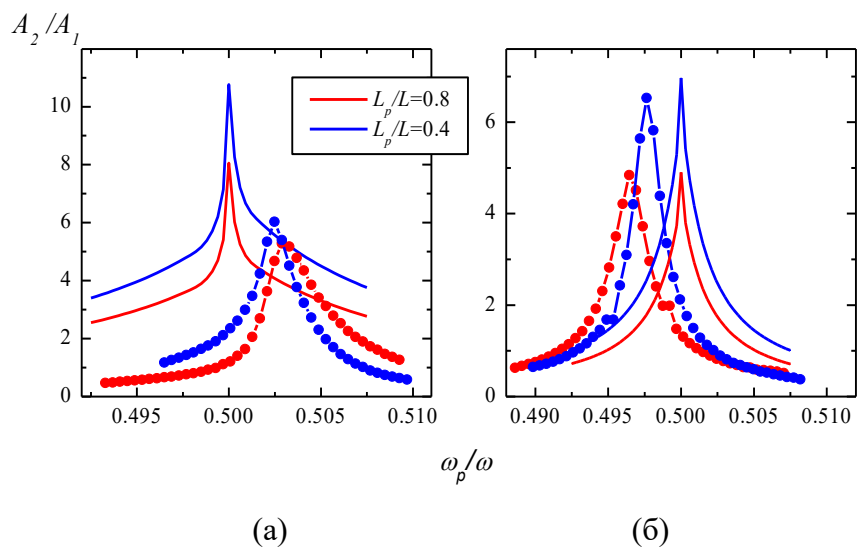


Рис. 12.23. Результати експериментальних досліджень супергармонічного резонансу порядку 1/2 зразків: (а) – вуглецева сталь; (б) – титановий сплав.

Цей експеримент підтвердив, що супергармонічний резонанс може бути використаний на практиці як чутливий індикатор пошкодження, а також, що теорія, яка передбачала можливість визначення місця розташування тріщини зміною точки прикладання сили є справедливою.

Субгармонічний резонанс виявився більш складним для практичної реалізації. На відміну від передбачень теорії, експеримент виявив, що цей режим коливань є вкрай нестійким, тобто може виникати і зникати раптово. У деяких випадках його не вдається збудити взагалі.

12.9. Практичне використання нелінійної вібродіагностики

Нелінійна вібродіагностика є непростю для практичного використання. Тут є багато проблем. Однак існують об'єкти, для яких нелінійна

вібродіагностика uszkodжень практично не має альтернативи. Це перш за все парові турбіни: масивні конструкції, які обертаються з великою швидкістю.

Основною проблема їх вібродіагностики полягає в тому, що вони повністю приховані під захисним кожухом, тобто відсутній прямий доступ до об'єкта діагностики (рис. 12.24).



Рис. 12.24. Парова турбіна в процесі експлуатації.

Чому так важливо проводити постійний контроль турбін? Справа в тому, що в процесі їх експлуатації в елементах турбіни виникають тріщини, які розвиваючись протягом тривалого часу можуть досягати критичного розміру, результатом чого є катастрофічне руйнування. Така катастрофа сталася в 1974 році в США. На рис. 10.1 показано площини руйнування валу турбіни. Аналогічна катастрофа сталася в РФ в 2002 році. Не тільки турбіна, але і машинний зал був повністю зруйнований. Причиною руйнування було накопичення втомного пошкодження в елементах валопроводу турбіни.

Цих катастроф, як і багатьох інших, можна було уникнути, якби пошкодження було вчасно виявлено. Величезна кількість аналітичних і експериментальних досліджень показали, що прояв нелінійності при коливаннях обертових валів з тріщиною втомі є надійною ознакою пошкодження.

На сьогоднішній день вібраційна діагностика турбін дозволяє відслідковувати вертикальну і горизонтальну складову динамічного

переміщення опор. Така діагностика дає можливість контролювати безпечний рівень поперечних вібрацій валопроводу турбіни при експлуатації.

12.10. Датчики для вимірювання вібраційних параметрів

Основною ідеєю вібродатчиків є перетворювання механічних коливань в електричний сигнал на основі різних фізичних явищ.

Вібродатчик – це технічний прилад, що генерує електричний сигнал, пропорційний до досліджуваного вібраційного параметру.

Проксиметр (датчик зміщення) – стаціонарно встановлений прилад, що має підсилювач сигналу і генерує напругу на виході, пропорційне відстані x до об'єкта діагностування, наприклад до ротора, що обертається (рис. 12.25). Зазвичай, датчик є вихрострумовим, тобто як чутливий елемент використовується котушка індуктивності, електромагнітне поле якої реагує на відстань до поверхні з феромагнетика. Переміщення валу вимірюється безконтактно.

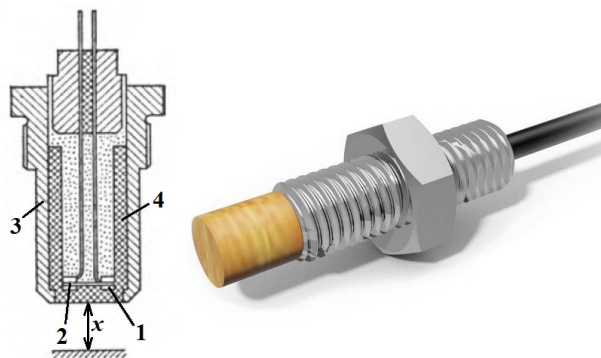


Рис. 12.25. Вихрострумний проксиметр: 1 – робоча котушка, 2 – котушка температурної компенсації, 3 – корпус, 4 – ізоляційна втулка.

Велосиметр – прилад для вимірювання віброшвидкості. У найпростішому випадку складається з котушки індуктивності та рухомого магніту, який розміщений всередині (рис. 12.26). Відносний рух магнітного поля в котушці провокує електричний струм, сила якого пропорційна швидкості переміщення. Частотний діапазон таких датчиків складає від 10 до 1000 Гц. Пружина та магніт створюють резонансну систему з власною частотою коливань в районі 10 Гц,

таким чином існує можливість підсилення усіх низькочастотних сигналів для більш точного вимірювання.

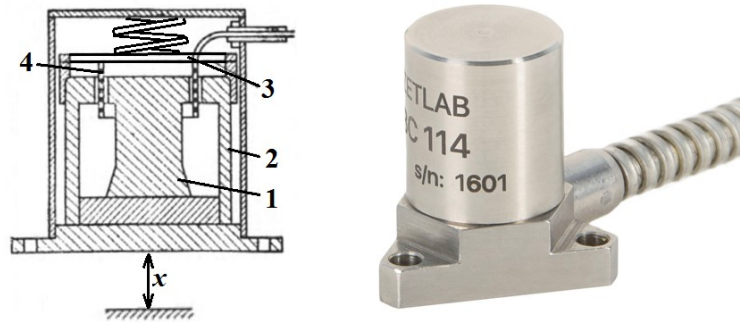


Рис. 12.26. Велосиметр: 1 – магніт, 2 – магнітопровід, 3 – пружина, 4 – інерційна котушка.

Акселерометр – перетворювач механічних коливань об’єкта в електричний сигнал пропорційний до віброприскорення. На сьогоднішній день є найбільш універсальними та широковикористовуваними датчиками. Чутливий елемент акселерометра складається з одного або кількох дисків, чи пластинок з п’єзоелектричного матеріалу (рис. 12.27). Особливістю цього матеріалу є можливість генерації електричного заряду при його деформуванні (зазвичай стисненню). Ця особливість зветься прямим п’єзоелектричним ефектом. Над чутливим елементом встановлюється інерційна маса, яка притискається до п’єзоелемента жорсткою пружиною. Під дією механічних коливань інерційна маса діє на п’єзоелемент із силою, пропорційною до віброприскоренню $F=ma$. В результаті п’єзоелектричного ефекту на поверхні п’єзоелемента виникає електричний сигнал, пропорційний прискоренню.

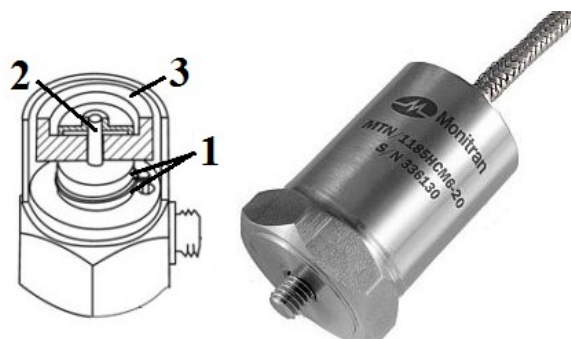


Рис. 12.27. Акселерометр: 1 – п’єзоелементи, 2 – пружина, 3 – інерційна маса.

Діапазон роботи акселерометрів залежить від заводського калібрування, але зазвичай є дуже високим і може досягати 100 кГц.

Контрольні запитання

1. На зміну якого параметра системи реагує вібраційна діагностика пошкодження?
2. Які вібраційні характеристики використовують для діагностики пошкодження?
3. Яка вібраційна характеристика є найбільш чутливою для виявлення тріщини?
4. Яким чином вібродіагностика пошкодження підвищує надійність енергетичного обладнання?

13. ВПЛИВ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ НА НАДІЙНІСТЬ ОБЛАДНАННЯ

13.1. Тертя і зношування. Основні поняття

Значна кількість енергетичного обладнання, яке використовується на ТЕС і АЕС містить обертові елементи, для яких характерний контакт поверхонь і, отже, їхнє зношування. При контакті двох спряжених поверхонь деталей та їх відносному переміщенні в поверхневих шарах виникають механічні та молекулярні взаємодії, які призводять до руйнування поверхонь, тобто зношення.

Зношення – це результат зношування. Під **зношуванням** розуміють процес відокремлення матеріалу з поверхні твердого тіла при терті.

Тертя – це опір, який виникає при взаємному переміщенні тіл, що стикаються. Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя [10] складається із двох опорів. Перший з них – це результат механічної взаємодії, при якому виступи однієї поверхні потрапляють у западини іншої (фрикційний зв'язок), а другий – це наслідок молекулярної взаємодії поверхонь тертя. Залежно від кінематики відносного переміщення тіл у машинах та механізмах відбуваються два види тертя: **тертя ковзання і тертя кочення**.

На межі контакту деталей можуть відбуватися пружні та пластичні деформації і молекулярне зчеплення. Залежно від наявності або відсутності мастила розрізняють такі види тертя (рис. 13.1): а) сухе – виникає між поверхнями тертя за відсутності мастила; б) рідинне – виникає у випадку повного розділення поверхонь шаром мастила; в) граничне – поверхні тертя розділені тонким шаром рідини (не більше 0,1 мкм).

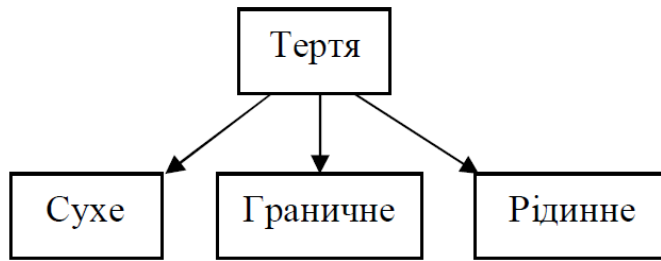


Рис. 13.1. Види тертя Залежно від кінематики відносного переміщення тіл і наявності мастил розрізняють і закони тертя.

Залежність сили *сухого тертя ковзання* F_k від нормального тиску N установив французький дослідник Г. Амонтон (1699 р.). Згідно з цим законом сила тертя є пропорційною вазі вантажу G (силі тиску N) і не залежить від величини площі дотику

$$F_k = fN,$$

де f – коефіцієнт тертя.

Л. Ейлер провів додаткові випробування ковзання тіла по похилій площині (рис. 13.2) та одержав рівняння для визначення коефіцієнта тертя:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - \frac{2l}{gt^2 \cos \alpha},$$

де α – кут нахилу; l – шлях, який пройшло тіло; g – прискорення вільного падіння; t – час переміщення на відстань l .

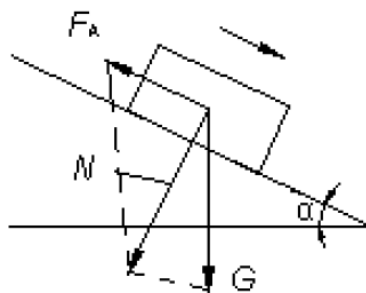


Рис. 13.2. Тертя ковзання.

Закон тертя кочення відкрив закон тертя кочення Ш. Кулон у 1799 році. Згідно з цим законом сила тертя кочення є прямо пропорційною нормальному тиску та обернено пропорційною радіусу котка

$$F_{\text{коч}} = f_{\text{коч}} \frac{N}{R},$$

де R – радіус котка; $f_{\text{коч}}$ – коефіцієнт тертя кочення.

Сила **рідинного тертя** F_p є прямо пропорційною коефіцієнту рідинного тертя f_p і навантаженню

$$F_p = f_p N .$$

Коефіцієнт рідинного тертя f_p залежить від виду мастила, швидкості взаємного переміщення контактуючих поверхонь і товщини шару мастила.

Відповідно до сучасних гіпотез процес зношування твердих конструкційних матеріалів поділяється на три послідовні явища:

- безпосередня взаємодія поверхонь;
- зміни, що відбуваються в поверхневому шарі;
- руйнування поверхонь.

Ці явища можуть взаємно впливати один на інший, внаслідок чого при відносному переміщенні поверхонь відбуваються зміни в поверхневому шарі елементів конструкцій. Руйнування є завершальним етапом зношування, але через те, що руйнуванням охоплюється не вся поверхня тертя одночасно, інші ділянки зазнають лише певних фізико-хімічних змін. Зміни в структурі поверхневого шару матеріалу виникають внаслідок деформацій, підвищення температури і хімічного впливу оточуючого середовища.

Зміни, обумовлені деформацією:

- багаторазові пружні деформації при терті коченні призводять до втомлювального викришування поверхонь, а при терті ковзанні пружні деформації шорсткостей розпушують їх структуру;

- пластичне деформування кристалічної ґратки твердих тіл (у даному випадку - поверхневого шару), яке може спричинити руйнування структури, що є заключним етапом пластичної деформації;

- пластична деформація при температурі поверхні нижче температури рекристалізації приводить до нагартування і подальшого зміцнення поверхневого шару.

Підвищення температури має такий вплив на зміни в поверхневому шарі:

- якщо температура поверхневих шарів вища від температури рекристалізації, то поверхневий шар не наклепується, а знаходиться в стані підвищеної пластичності, внаслідок чого відбувається вигладжування поверхонь;

- висока температура і пластична деформація сприяють дифузійним процесам (науглецьовуванню, окислюванню, взаємному дифузійному проникненню матеріалів пари при терті);

- при раптовому локальному підвищенні температури можливе утворення загартованих структур (цьому сприяють високі тиски, які знижують критичні точки структурних перетворень).

Хімічна дія середовища впливає на зміни в поверхневому шарі деталей таким чином:

- на оголених внаслідок зношування чистих ювенільних металевих поверхонь утворюються оксидні плівки під дією кисню повітря або кисню, який міститься в технологічному середовищі чи в мастилi (ці плівки захищають поверхні від схоплювання. Дослідження тертя тіл у вакуумі, азоті, аргоні, гелії показали достатньо високу інтенсивність зношування, а на повітрі – набагато меншу. Це відбувається внаслідок утворення захисних плівок);

- при взаємодії металевих поверхонь з хімічно-активними присадками до мастил утворюються захисні плівки. Плівки ефективно захищають поверхні від зношування, якщо швидкість їхнього утворення перевищує швидкість їх руйнування.

- внаслідок розкладання мастила або технологічного змащувального середовища при високій температурі можливе насичення поверхні вуглецем.

- агресивні рідини і гази інтенсифікують процес зношування.

Державний стандарт встановлює такі види зношування [11]:

1. Механічне – зношування внаслідок механічних впливів.

2. Корозійно-механічне – зношування в результаті механічного впливу, що супроводжується хімічною або електричною взаємодією матеріалу з середовищем.

3. Абразивне-механічне зношування матеріалу в результаті переважно ріжучої дії на матеріал твердих часток, що знаходяться у вільному чи закріпленому стані.

4. Ерозійне-механічне зношування внаслідок дії потоку рідини або газу.

5. Гідроабразивне (газоабразивне) зношування – абразивне зношування внаслідок дії твердих часток, завислих у рідині (газі), які переміщуються відносно зношуваного тіла.

6. Втомлювальне – механічне зношування в результаті втомлювального руйнування при циклічному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару, яке може відбуватись як при терті кочення, так і при терті ковзання.

7. Кавітаційне – гідроерозійне зношування при переміщенні твердого тіла відносно рідини, при якому бульбашки газу, розчиненого в ній, захоплюються поблизу поверхні, внаслідок чого створюється місцеве підвищення тиску і температури.

8. Зношування при заїданні, що відбувається внаслідок схоплювання, глибинного виривання матеріалу, переносу його з однієї поверхні тертя на іншу і дії утворених нерівностей на сполучену поверхню.

9. Окислювальне зношування – корозійно-механічне зношування, при якому основний вплив на його протікання й інтенсивність забезпечує хімічна реакція матеріалу з киснем або навколишнім середовищем.

10. Зношування при фретингу – механічне зношування сполучених тіл при малих коливальних відносних переміщеннях.

11. Зношування при фретинг-корозії – корозійно-механічне зношування сполучених тіл при малих коливальних відносних переміщеннях.

12. Електроерозійне – ерозійне зношування поверхні внаслідок дії на неї розрядів при проходженні електричного струму.

13.2. Корозійні випробування металів як метод підвищення надійності

Корозія – це реакція, що відбувається на межі різних фазових середовищ. У природі цей процес відбувається з виділенням енергії, тому його можна лише призупинити (зупинити неможливо).

Найбільш поширеною є **електрохімічна корозія**. Під її дією руйнуються поверхні різних типів енергетичного обладнання.

Методи визначення й оцінювання корозійної стійкості металів і сплавів поділяють на якісні та кількісні.

Якісні методи не дають повної характеристики стійкості металів і є допоміжними, але важливими, адже у багатьох випадках заздалегідь не можна встановити характер та інтенсивність корозійного процесу.

Використовують такі якісні методи визначення корозії:

- зовнішній огляд зразків після впливу агресивного середовища, що дає можливість визначити характер і вид корозії, глибину пошкоджених ділянок, форму і місце їх розташування;
- спостереження за змінами, що відбуваються в розчині (зафарбування, скаламучування, поява продуктів корозії у вигляді осаду тощо);
- мікроскопічне дослідження зразків після корозії (цей метод застосовують тоді, коли передбачається міжкристалітна корозія або руйнування від спільної дії середовища та механічних напружень).

Найпоширенішими кількісними методами дослідження корозії є:

- визначення швидкості корозії ваговим способом;
- визначення швидкості корозії об'ємним способом;
- визначення зміни механічних показників після впливу середовища;
- електрохімічні вимірювання.

Ваговим способом визначають різницю маси зразка до і після випробувань. Залежно від виду продуктів корозії, що утворюються, маса дослідного зразка може зменшуватися або збільшуватися. При утворенні на поверхні продуктів

корозії відбуватиметься приріст маси зразків, а коли продукти корозії видаляються, то маса зразків зменшуватиметься.

Оцінювання корозійної стійкості проводять за глибинним показником проникнення корозії (мм/рік) і визначають за 10-бальною шкалою. Для невідповідальних деталей машин і апаратів застосовують метали і сплави, швидкість корозії яких не перевищує 1 мм/рік.

Дані про втрату маси зразків характеризують лише рівномірну корозію. При міжкристалітній і місцевій корозії технологічний апарат може вийти з ладу навіть тоді, коли маса не втрачається.

Оцінювання зміни механічних властивостей матеріалу після впливу на нього агресивних середовищ є дуже важливим при оцінці надійності енергетичного обладнання.

При статичному розтягуванні зразка після корозійних випробувань можна встановити зменшення границі міцності і відносного видовження. Чим більший переріз зразка, тим менше знижується границя міцності. Тому цей вид випробувань слід використовувати для визначення впливу корозії на зміну механічних властивостей листових матеріалів і тонкостінних труб.

Особливо він цінний за наявності міжкристалітної корозії. Схильність легованих сталей до міжкристалітної корозії можна виявити за зміною металевого звуку зразка, електричного опору і металографічним способом. Електрохімічні вимірювання дають змогу визначити потенціал металеві поверхні в агресивному середовищі, її схильність до пасивації, що уможливорює прогнозування корозійної стійкості.

Враховуючи небезпечність корозії для цілісності енергетичного обладнання, розроблено багато способів захисту від неї. Серед них:

- хромування захисне і захисно-декоративне;
- нікелювання захисне і захисно-декоративне;
- цинкування;
- кадмування;

- оксидування;
- металокераміка.

Гальванічні покриття наносять на поверхні деталей осадженням металів із водяних розчинів їхніх солей під дією постійного електричного струму. Хімічні покриття одержують за рахунок взаємодії поверхневих шарів металів і сплавів з хімічними реагентами без застосування електричного струму від зовнішнього джерела.

13.3. Фретинг-корозія і її вплив на надійність енергообладнання

Фретинг-корозія — це процес руйнування металу під час циклічного взаємного переміщення двох поверхонь, що контактують, і дії корозійного середовища. Вона виникає внаслідок безперервного руйнування захисної оксидної плівки в точках рухомого контакту. Таким чином, це більш складне явище, ніж просто корозія, оскільки поєднує у собі і хімічні (електрохімічні), і механічні процеси.

Теорія фретинг-корозії полягає в тому, що при терті метал в точках контакту зазнає багаторазових пружних і пластичних деформацій, які приводять до його руйнування на окремих ділянках і відділення частинок зносу. Такий процес розглядається як фрикційна втома або втомлювальне зношування. Кількість впливів (циклів), при яких відбувається руйнування металу поверхні, залежить від напруженого стану і міцності поверхні матеріалу та змінюється в широкому діапазоні. Зносостійкість матеріалу визначається, в основному, кількістю циклів, яке може витримати поверхневий шар без руйнування.

У першому наближенні інтенсивність зношування визначають за формулою:

$$J = (0,1/n)\sqrt{h/R}(P_a/P_r),$$

де J – інтенсивність зношування; n – число циклів до руйнування; h/R – відносна глибина впровадження виступів шорстких контактуючих поверхонь; P_a і P_r – номінальний і фактичний тиски в зоні контакту.

Взаємодія контактуючих поверхонь проявляється в формуванні площ контакту, в утворенні яких беруть участь не тільки виступи, але і прилеглий до них матеріал. При виникненні і подальшому роз'єднанні контактів деформується поверхневий шар матеріалу. Площі контакту (плями дотикання), що утворюються при спільній дії нормальних і тангенціальних сил та зникають при їхньому знятті, називають фрикційними зв'язками.

Розрізняють механічну і молекулярну взаємодію поверхонь тертя. У першому випадку має місце механічне зчеплення поверхонь, в другому – сполучені поверхні знаходяться під дією атомарних сил.

Залежно від величини адгезії і відносної глибини впровадження одиничної нерівності розрізняють наступні види фретинг-корозії:

- пружне відтиснення матеріалу (рис. 13.3, а);
- пластичне відтиснення матеріалу (рис. 13.3, б);
- зріз впровадженого матеріалу (рис. 13.3, в);
- схоплювання оксидних плівок, які покривають поверхні твердих тіл, та їхнє подальше руйнування (рис. 13.3, г);
- схоплювання поверхонь, яке супроводжується глибинним вириванням матеріалу (рис. 13.3, д).

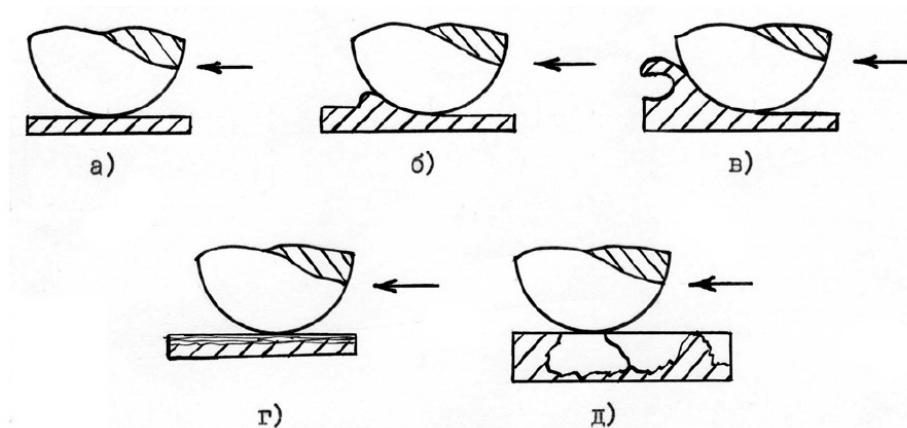


Рис. 13.3. Види руйнувань при фретинг-корозії.

Умови переходу від першого виду руйнувань до другого і третього залежать від глибини впровадження однієї деталі в іншу та величини сил адгезії. Здійснення четвертого і п'ятого видів руйнування фрикційних зв'язків

визначається співвідношенням між міцністю плівок і основного металу. Якщо міцність плівки нижче міцності основного металу, має місце четвертий вид порушення фрикційних зв'язків, а якщо міцність плівки або поверхневих шарів, позбавлених плівки, більше міцності основного металу - здійснюється п'ятий вид руйнування.

Шляхи попередження фретинг-корозії:

- збільшення механічної жорсткості з'єднань деталей і площі контакту;
- використання матеріалів з високою міцністю оксидних плівок;
- зміцнення контактних поверхонь деталей азотуванням або цементацією;
- іонна імплантація азоту (іонне легування) у поверхневі шари матеріалу;
- нанесенням тонких (10...30 мкм) твердих плівок на основі нітриду титану або цирконію
- використання масляних плівок.

13.4. Кавітаційне зношування

Кавітація (від латинського *cavitas* – порожнина) – це порушення суцільності всередині рідини, тобто утворення в ній порожнин. Кавітація характеризується виникненням у потоці рідини так званих кавітаційних бульбашок (пухирців), заповнених паром, газом або повітрям. Вони виникають у випадку, коли тиск у потоці рідини стає меншим, ніж тиск насиченої пари для даної температури. При подальшому русі утворені пухирці потрапляють у зону підвищеного тиску і відбувається їх руйнування. При захопленні пухирців тиск збільшується до десятків атмосфер, і якщо воно відбувається на поверхні деталі, то це призводить до її руйнування.

Кавітаційне зношування – це механічне зношування під час руху твердого тіла відносно рідини, за якого пухирці газу лопаються поблизу поверхні, що створює місцевий ударний тиск. Зношування від кавітації характерне для гідравлічних машин, коли в потоці рідини утворюються пухирці пари та газу, при переході в зону високих тисків відбувається конденсація пари і створюються

умови для місцевого гідравлічного удару. При цьому дія тиску на поверхню буває настільки значною, що виникають глибокі каверни, які можуть зливатися і утворювати навіть наскрізний отвір (рис. 13.4).



Рис. 13.4. Кавітаційне зношування робочого колеса насоса.

Кавітація негативно впливає на роботу машин і їх технічний стан. При цьому відбуваються зміна характеристик роботи машини (зменшення подачі, напору, ККД), руйнування поверхонь деталей (викришування металу), спостерігаються шум і вібрація.

13.5. Інші види зношування

Окрім розглянутих вище видів зношування у елементах енергетичного обладнання має місце також абразивне, гідроабразивне, гідроерозійне зношування та зношування внаслідок утомлюваності.

Абразивне зношування – це механічне зношування матеріалу внаслідок різальної або дряпаючої дії твердих тіл чи частинок. Абразивні частинки можуть бути мінерального походження, металевими, продуктами окиснення поверхонь деталей та ін. Основне джерело потрапляння абразивних часточок у контактні поверхні машин – докільця. Більшість абразивних часточок мають розмір 5–120 мкм, тобто співрозмірні із зазорами в сполученнях машин. Швидкість абразивного зношування залежить від кількості абразивних часточок та їх

твердості. Для зниження абразивного зношування твердість робочої поверхні деталі повинна бути в 1,3 рази вищою за твердість абразиву.

Різновидом абразивного є *гідроабразивне* зношування. Це абразивне зношування внаслідок дії твердих тіл або твердих частинок, що виносяться потоком рідини. Таке зношування характерне для гідравлічних машин і гідроприводів.

Ерозійне зношування внаслідок дії потоку рідини називається гідроерозійним. Ерозія металів – комплексний фізичний та фізико-хімічний процес, що відбувається внаслідок впливу доквілля, окиснення, наклепу, температурних напружень та від утомлюваності. Прикладом ерозійного зношування машин є зношування розподільників гідравлічної апаратури.

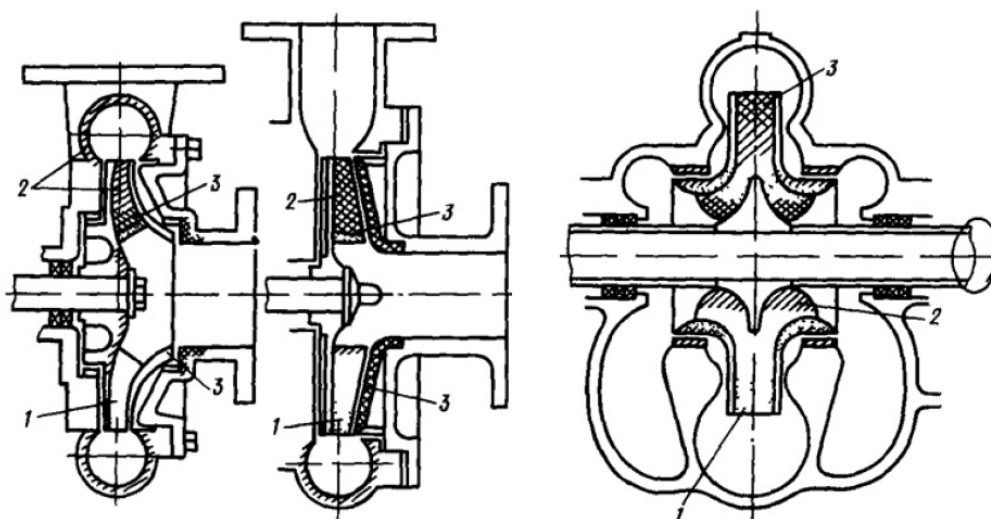


Рис. 13.5. Зони зношування робочих органів насосів: 1 – область кавітаційної ерозії; 2 – область гідроабразивного зношування; 3 – область спільної дії кавітації та гідроабразивного зношування.

Різновидом гідроерозійного зношування є кавітаційне.

На рис. 13.5 наведені місця зношування різного виду від дії перекачуваної води на робочі колеса відцентрових насосів, встановлених на водопровідній насосній станції.

Зношування від утомлюваності – це механічне зношування внаслідок руйнування від утомлюваності при повторному деформуванні мікроб'ємів

поверхневого шару. Явище зношування від утомлюваності відбувається при терті кочення і терті ковзання. Основою цього виду зношування є утворення фрикційних зв'язків при прикладенні нормального навантаження в разі відносного ковзання поверхонь тертя.

Зношування від утомлюваності найчастіше спостерігається в умовах високих контактних навантажень при одночасному коченні та проковзуванні однієї поверхні по іншій. За таких умов працюють важко навантажені шестерні та підшипники кочення.

Розширення сфери застосування гідромеханізації та гідротранспорту і впровадження їх у різні галузі народного господарства поставили вимогу оснащення енергетичних, будівельних, гірничорудних, металургійних, хімічних та інших підприємств відцентровими насосами для перекачування абразивних гідросумішей (грунтовими, пісковими, шламовими). Основним експлуатаційним недоліком цих насосів є малий термін служби деталей проточної частини з причини інтенсивного гідроабразивного зношування.

За характером зношування всі деталі насосів можна поділити на дві групи. До першої групи належать робоче колесо і відвід, проточні канали яких зношуються найбільше. Під час перекачування гідросумішей з великими твердими включеннями ці деталі ще й піддаються ударам. Найбільш інтенсивно зношуються лопаті робочих коліс на вході й на виході, внутрішні поверхні їх дисків, поверхні відводу в зоні розрахункового перерізу та вхід в дифузор. Усмоктувальний патрубок зношується значно менше.

До другої групи належать деталі, що зношуються за рахунок перетікання гідросуміші з порожнини під великим тиском в порожнину з меншим тиском: бронедиски, зовнішні диски коліс, деталі ущільнень з боку всмоктування і вузол сальникового ущільнення. Зношування цих деталей збільшується під час транспортування гідросумішей з дрібними твердими включеннями.

В основному зношення деталей визначається абразивністю гідросуміші й твердістю матеріалу деталей. Робочі органи насосів зношуються за рахунок

контакту твердих частинок, що рухаються з рідиною, зі стінками каналів проточної частини насоса. На характер та інтенсивність зношування, крім твердості матеріалу, впливають швидкість і концентрація твердих частинок та кути натікання потоку рідини на лопаті робочого колеса.

Чинників зношування гідравлічних пристроїв та гідроприводів доволі багато: режим роботи, фізико-хімічні характеристики пар тертя, технологія виготовлення деталей, конструктивні особливості, тип робочої рідини та ін. Кожний з цих чинників спричиняє фізичні, хімічні або структурні зміни в поверхневому шарі зношеної деталі. Статистична обробка результатів випробувань та експлуатація гідроприводів показали, що найбільш слабкою ланкою є насос, в якому до проблемних відносять деталі розподільчої, рідше поршневої групи. Для гідроприводів найбільшими є втрати від поступових відмов, тобто зношування деталей під час їх роботи і втрати вузлами машин своїх початкових параметрів.

Як правило, зношування гідросистем пов'язують з їх забрудненням. Забруднення можуть бути у вигляді твердих, рідких і газоподібних включень. Кожне з них може значною мірою впливати на зношування деталей. Для гідравлічних приводів верстатів найбільш небезпечними є нагрів рідини, попадання механічних домішок, води і повітря.

Найбільший вплив на надійність і довговічність гідроприводів чинять механічні включення робочої рідини. Внаслідок забруднення робочих рідин з ладу виходить близько 75 % гідроприводів, майже половина аварій в авіації пов'язана із забрудненням робочих рідин, ресурс гідронасосів зменшується в 10–12 разів, 65 % відмов рульового керування також пов'язані із забрудненням рідини.

Характерні відмови насосів різного типу.

Відмова підшипників кочення. Ознаки: шум, вібрація, збільшення люфту і споживаної потужності внаслідок тертя в ущільненнях. Причини: руйнування

елементів конструкції внаслідок утомлюваності. Усунення недоліку: заміна підшипників.

Відмова підшипників ковзання. Ознаки: шум, вібрація, збільшення люфту і споживаної потужності внаслідок тертя в підшипниках. Причини: зношення вкладишів, вала. Усунення недоліку: заміна вкладишів, підшипників, втулки, вала.

Відмова муфти. Ознаки: удари при ввімкненні та зупинці насоса. Причини: зношення пружних елементів. Усунення недоліку: заміна пружних елементів.

Відмова сальника. Ознаки: зношення втулки, неможливість зменшити витoki рідини підтягуванням сальника. Причини: зношення набивки, значний знос втулки. Усунення недоліку: заміна набивки або втулки.

Відмова торцевих ущільнень. Ознаки: великі витoki рідини під час роботи та зупинки насоса. Причини: граничне зношення пари тертя, руйнування пружини. Усунення недоліку: заміна елементів, що відмовили, або всього ущільнення.

Відмова за параметрами. Ознаки: зменшення напору та ККД при постійній подачі. Причини: кавітаційний, ерозійний та корозійний знос лопатей робочого колеса, дисків, ущільнень та інших елементів. Усунення недоліку: заміна або відновлення робочого колеса, кілець ущільнення.

Відмови гідро- і пневмоприводів. За результатами аналізу відмов при експлуатації гідро- і пневмоприводів різних типів встановлено, що понад 90 % з них часткові і лише близько 10 % – повні, близько 60 % – параметричні і 40 % – функціональні. При цьому до параметричних відмов віднесені випадки виникнення витоків рідини, а до функціональних – прояв нестійкості і випадки пошкодження механічних елементів, які ще не призвели до втрати їх функціонування.

Порівняльний аналіз різних видів відмов показав, що частки раптових і поступових відмов приблизно однакові. Більша частина відмов обумовлена зовнішньою негерметичністю, решта – невідповідністю параметрів

встановленим рівням, відсутністю функціонування агрегата або його елементів, порушенням динамічної стійкості, внутрішніми витокami, пошкодженнями фільтрів та ін.

Під час аналізу "слабких ланок" установлено, що причиною більшості відмов гідроприводів при експлуатації є ущільнення (рухомі, напіврухомі, нерухомі), золотникові розподільники, механічні пристрої, електричні елементи, клапани і фільтри. Частка повних відмов у загальній їх кількості для гідравлічних приводів з механічним керуванням становить приблизно 3%, а для електрогідравлічних приводів – 14 %. Переважна більшість з них зумовлена відсутністю функціонування, решта – руйнуванням механічних елементів та негерметичністю приводів.

До повних відмов гідроприводів призводять відмови електроелементів (у першу чергу датчиків зворотного зв'язку), електрогідравлічних підсилювачів і клапанів, механічних елементів, золотникових розподільників та ущільнень.

13.6. Змащування машин і механізмів

Працездатність механізмів і машин, їх довговічність істотно залежать від раціонального змащування.

Масильний матеріал як елемент виконує наступні функції:

- знижує сили тертя, що виникають у ділянці контакту її елементів;
- зменшує спрацювання та запобігає схоплюванню рухомих дотичних поверхонь;
- відводить тепло із зони тертя;
- захищає поверхні тертя елементів системи та інші неізольовані від корозійного впливу зовнішнього середовища поверхні;
- ущільнює зазори між спряженими елементами трибосистем;
- видаляє із зони спряження деталей продукти спрацювання, корозії та різні забруднення.

Масильні матеріали повинні мати такі основні властивості:

- забезпечувати надійне виконання своїх функцій у широкому діапазоні зміни умов використання;
- мінімально змінювати свої властивості в процесі експлуатації;
- не впливати на властивості матеріалів, що контактують з ними;
- мати належні екологічні характеристики (бути пасивними щодо зовнішнього середовища, мінімально пожежо- та вибухонебезпечними, мати здатність до багатократної регенерації та повної утилізації тощо);
- виготовлятися з легкодоступної сировини та мати невисоку вартість.

Змащувальна ефективність мастильного матеріалу залежить від багатьох взаємопов'язаних чинників, що у сукупності визначають характер дії на процес тертя і спрацювання змащуваних поверхонь, а саме від властивостей самого мастильного матеріалу, в тому числі від його трансформації в процесі експлуатації; стану і властивостей поверхонь тертя та їхньої зміни протягом експлуатації; характеру взаємодії між компонентами мастильного матеріалу, поверхнями тертя і плівками, які утворюються на них; параметрів режиму тертя (швидкості, навантаження, температури тощо).

Взаємодія цих чинників має складний і суперечливий характер. Додаткової складності додає нестабільність властивостей більшості з них через зміни умов роботи змащуваних поверхонь, що ускладнює раціональний вибір мастильного матеріалу.

Як мастильні матеріали використовують речовини в *різних агрегатних станах*: газоподібному і змішаному (аерозолі, емульсії), рідкому, пластичному і твердому.

За призначенням мастила поділяють на моторні, трансмісійні, індустріальні, гідравлічні, турбінні, компресорні, електроізоляційні, консерваційні, технологічні та спеціальні.

Моторні мастила використовують для поршневих двигунів внутрішнього згоряння (бензинових, дизельних і авіаційних).

Трансмiсiйнi мастила призначенi для змащування механiчних i гiдромеханiчних передач.

Индустриальнi мастила застосовують для зменшення коефiцiєнта тертя у вузлах тертя промислового обладнання. Водночас вони призначенi для вiдведення теплоти, захисту деталей вiд корозii, очищення поверхонь тертя вiд забруднення, ущiльнення, запобiгання зчепленню поверхонь тертя. Такi оливи подiляють на чотири групи: для гiдросистем; для напрямних ковзання; для зубчастих передач; для пiдшипникiв кочення.

Гiдравлiчнi мастила (рiдини) використовують як робоче тiло в гiдросистемах рiзних машин. Для амортизаторiв (через специфiку iхньої роботи) застосовують спеціальнi оливи, робочий дiапазон температур яких має становити вiд -0 до $+400^{\circ}\text{C}$.

Турбiннi мастила призначенi для змащування трибосистем рiзноманiтних турбiн, турбокомпресорiв, турбонасосiв тощо.

Компресорнi мастила використовують для змащування i герметизацii вузлiв тертя рiзних компресорiв i вакуумних насосiв.

Електроiзоляцiйнi мастила призначенi для захисту електротехнiчних виробiв, вузлiв, апаратури вiд електропробою.

Консервацiйнi матерiали (оливи, розчини з обмеженою розчиннiстю, аерозолi, емульсiї) призначенi для захисту технiчних виробiв, вузлiв, апаратури, машин, конструкцiй вiд атмосферної корозii i корозiйно-механiчного спрацювання. До цiєї групи входять тiльки оливи для консервацii i ходовi.

Технологiчнi мастила використовують як робоче середовище в технологiчних процесах (оброблення рiзанням, пластичного оброблення, термообробки, у виробництвах бетонних виробiв, ливарних форм, керамiки).

Спеціальнi мастила призначенi для забезпечення особливих i конкретно визначених функцiй (насичувальна, для механiзмiв, ланцюгiв тунельних печей, для герметизацii свердловин, паяльна, парфумерна, медична та iн.).

Мастила класифікують також за критеріями в'язкості та якості. Моторні й трансмісійні мастила, зокрема, класифікують за обома критеріями, а індустріальні мастила – тільки за критерієм в'язкості. Якісно мастила поділяють на звичайні (без присадок), з присадками і з наповнювачами (твердими мастилами). За в'язкістю моторні мастила бувають літні, зимові та загальносезонні.

Мастила призначені для зменшення і запобігання спрацюванню, зниження коефіцієнта тертя. У багатьох випадках мастила одночасно мають відводити теплоту із зони тертя, запобігати корозії, виконувати спеціальні функції, наприклад передавати рух у гідроприводах. Тому експлуатаційні властивості мастил поділяють на *змащувальні та службові*.

Змащувальні властивості характеризують здатність мастила забезпечувати працездатність поверхонь тертя завдяки максимальному зменшенню їхнього спрацювання і зниженню сил тертя. Службові властивості, зокрема в'язкість, експлуатаційна стабільність, корозійна активність є допоміжними.

Ефективність змащувальної дії мастила залежить не тільки від її властивостей, а й від характеру взаємодії з поверхнями тертя, від зовнішніх чинників, які характеризують умови застосування змащування (режиму і кінематики тертя, властивостей матеріалів контактуючих деталей, геометричної форми і мікропрофілю поверхонь тертя тощо).

Експлуатаційні властивості мастил (насамперед, в'язкість) забезпечують прямий або непрямий вплив на змащувальну здатність. Вони мають задовольняти певні норми роботи технічних об'єктів, бо інакше під час експлуатації машин і обладнання можуть бути ускладнення, навіть коли ці мастила мають найкращі змащувальні властивості. Найважливішою об'ємною властивістю мастила, їхньою експлуатаційною характеристикою, що визначає можливість рідинного змащування є в'язкість. Вона зумовлює несівну здатність мастильного шару і, отже, змащувальну здатність, характеризує дію мастил для різних умов експлуатації технічних об'єктів.

В'язкістю (або внутрішнім тертям) рідини називають опір відносному зсуву її шарів під дією прикладеної сили. Одна і та сама сила в різних рідинах створює різні швидкості зсуву шарів, які розміщуються на однаковій відстані один від одного.

Стабільність – здатність мастила зберігати свої властивості під час експлуатації та зберігання, тобто протистояти старінню. Причиною старіння оливи є окиснення киснем повітря, внаслідок чого утворюються шкідливі кислоти і смоли. Інтенсивність старіння є основним показником, що визначає термін використання мастила в механізмах. Стабільність мастила найчастіше оцінюють за їх здатністю відкладатися на поверхнях у вигляді плівок різної товщини залежно від температури використання. Це найважливіша після в'язкості експлуатаційна властивість мастила.

Корозійна активність. За наявності в мастилах кислот, лугів, води, агресивних присадок може виникнути корозія змащуваних металів. Нафтові оливи, нелеговані антикорозійними присадками, недостатньо захищають метали від корозії. Якщо мастила містять агресивні продукти окиснення і нафтові кислоти, які залишилися після очищення нафти, вони також можуть стимулювати корозію змащуваних поверхонь.

Мастила, які містять хімічно-активні речовини (сірку, хлор), можуть негативно впливати на деякі неметалеві матеріали, наприклад гумові та шкіряні ущільнення, які стають крихкими і руйнуються. Мастила часто зумовлюють набрякання або усадку гумових ущільнень, що потребує підбору взаємосумісних оливи і ущільнень.

13.7. Шляхи підвищення працездатності енергетичного обладнання

Працездатність залежить від швидкості зміни параметрів технічного стану машини. Висока працездатність машини забезпечується поліпшенням її конструкції, фізико-механічних властивостей матеріалів і вузлів тертя. Для цього необхідно використовувати зносостійкі матеріали і високоякісні мастила,

забезпечити точну обробку деталей вузлів, дотримуватися періодичності технічного обслуговування та ремонтів машини, а також якісного їх виконання. Це збільшує напрацювання машини між відмовами.

Робота машини в заданому технічною документацією робочому режимі зменшує випадки її перевантаження.

Будь-яка машина при експлуатації, зберіганні та транспортуванні зазнає внутрішнього і зовнішнього впливу, в результаті якого порушується її працездатність. Основні процеси пошкодження машини продемонстровано на рис. 13.6.

Під дією механічних навантажень виникають різні внутрішні напруження і, як наслідок, деформації, тріщини і поломки деталей.

Деталі машин в основному руйнуються під дією силових навантажень, тепла та світла, електричних і магнітних полів, хімічного середовища, тертя та ін. Під дією цих чинників відбувається зміна стану машини.

У деталях машини відбуваються такі перетворення: а) пластична деформація, що призводить до збільшення напруги в матеріалі деталей; б) утомлюваність у випадку, коли деталі зазнають статичних і циклічних навантажень (рами, вали, пружини та ін.); в) теплове руйнування, що відбувається під дією нагріву деталей, при яких змінюється структура матеріалу і вони втрачають свої початкові властивості (циліндри, поршні, вкладиші підшипників та ін.); г) хімічне (корозійне) руйнування – це руйнування матеріалів внаслідок хімічної або електрохімічної взаємодії; д) зношування машини внаслідок тертя.

Тріщини є результатом дії змінних навантажень. З часом вони збільшуються і це спричинює руйнування деталі. Поломки відбуваються в найбільш неміцних місцях (переходи, різі, шпонки та ін.). Зношування – це процес поступової зміни деталі під дією тертя. Характер цього процесу визначається видом тертя, фізико-хімічними властивостями матеріалу, швидкістю відносного переміщення поверхонь тертя, величиною і характером навантаження, видом і якістю мастил,

умовами експлуатації та ін. При корозії відбувається зміна матеріалу під дією довкілля (повітря, рідини, газу, температури тощо). Метали при цьому змінюють свої властивості.



Рис. 13.6. Процеси, що зумовлюють пошкодження машини.

Навіть за найдосконалішої конструкції та ретельного обслуговування фізичне спрацювання машин неминуче. Фізичне зношування можна розглядати як функцію від часу. Основною причиною, яка призводить до втрати працездатності більшості машин, є зношення сполучених деталей.

Стійкість матеріалу проти зношування залежить не лише від властивостей вибраного матеріалу, а й від технології виготовлення деталей, припрацювання їх у початковий період експлуатації та багатьох інших факторів. На працездатність машини впливають усі види енергії: механічна, теплова, електромагнітна, хімічна та інші. Механізм втрачання машиною працездатності досить складний і залежить від комплексу процесів, що відбуваються під час експлуатації машини. При цьому пошкодження деталей машин поділяють на допустимі і недопустимі. Допустимі пошкодження виникають, як правило, за нормальних

умов експлуатації машини. Це руйнування від зношування, утомлюваності і старіння матеріалу.

Процесом старіння називають необоротну зміну властивостей або стану матеріалу виробу внаслідок дії різних факторів. Допустимі пошкодження усувають, як правило, під час планових ремонтів машин. Недопустимі пошкодження мають аварійний характер, ці пошкодження або відмови виникають унаслідок недостатньої міцності матеріалу чи від утомлюваності. Це теплові тріщини, викришування частинок із поверхонь тертя тощо. Відмови деталей через недопустимі пошкодження усувають під час непланових ремонтів.

Контрольні запитання

1. Які умови виникнення процесу зношування?
2. Які види зношування встановлює державний стандарт?
3. Яка принципова відмінність між корозією і фретинг-корозією?
4. Якими чинниками визначається інтенсивність зношування?
5. Якими є умови кавітаційного зношування?

14. НАДІЙНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК ОСНОВНИЙ ЧИННИК ЯКОСТІ, ЕФЕКТИВНОСТІ І ЕКОНОМІЧНОСТІ

14.1. Якість і надійність технічних систем

Надійність і довговічність – основні показники якості, ефективності й економічності виробів. Ці показники закладаються на стадії проектування виробів, забезпечуються під час їх виробництва і підтримуються у період експлуатації.

Так стандарт [12] установлює моделі забезпечення якості в процесі проектування, виробництва і обслуговування виробів, а стандарт [13] – опис елементів, що мають складати систему забезпечення якості виробів на підприємстві. Вибір номенклатури показників для оцінювання рівня якості обладнання залежить від мети цього оцінювання. Універсальний характер зазначених стандартів і описаних в них систем якості вимагає знань теорії та методів управління якістю продукції. В даний час впровадження систем якості на основі міжнародних стандартів стає нагальною потребою, у тому числі для підвищення надійності і конкурентоздатності обладнання.

Найбільш узагальненою характеристикою будь-якого обладнання є якість.

Якість – це сукупність властивостей, що визначає ступінь відповідності обладнання його призначенню.

Оцінка якості – перший і основний етап системи управління якістю. Для вирішення питань організації і впровадження державної системи управління якістю, що включає питання планування, прогнозування, оптимізації та інші, необхідні об'єктивні методи оцінки якості.

Якість оцінюється щонайменше на основі десяти показників:

- відповідність основному призначенню;
- надійність;
- вартість;
- технологічність;

- безпека;
- екологічність;
- естетичність;
- ергономічність;
- стандартизованість;
- патентоспроможність.

Показники призначення обладнання характеризують основні функції, для виконання яких воно призначено (технічні параметри машин, наприклад продуктивність, швидкість, точність, тощо).

Показники надійності характеризують зміну основних показників призначення в часі. Основні показники надійності — це працездатність, довговічність, ремонтпридатність, збережуваність і готовність.

Економічні показники характеризують затрати на розроблення, виготовлення та експлуатацію виробу, а також економічну ефективність його експлуатації. Інтегральним економічним показником для споживача є ціна виробу.

Технологічні показники характеризують розподіл затрат матеріалів, засобів праці в часі при технологічній підготовці виробництва, виготовленні та експлуатації продукції (трудомісткість, матеріаломісткість, енергоємність, собівартість).

Показники безпеки кількісно характеризують безпеку людини при використанні виробу (наприклад, імовірність отримання травм під час аварій).

Екологічні показники характеризують вплив об'єкта при експлуатації на навколишнє середовище (викиди газів в атмосферу, забруднення води тощо).

Естетичні показники характеризують композиційну цілісність, інформаційну виразність, раціональність форми, культуру виконання виробу. Кількісні показники тут встановити важко і вони замінюються системою рівнів у п'ятибальній системі: 5—кращий зі світових; 4—на рівні світових;

3—національний рівень; 2—для внутрішнього ринку; 1—нижче від рівня внутрішнього ринку.

Ергономічні показники пов'язані з участю людини в роботі чи експлуатації виробу. До таких показників належать гігієнічні, антропологічні, фізіологічні, психологічні, вплив умов експлуатації на людину (освітлення, вібрація сидіння, шум, загазованість тощо).

Показники стандартизації й уніфікації характеризують насиченість продукції уніфікованими та оригінальними частинами, а також рівень уніфікації з іншими виробами.

Показники патентоспроможності (патентна чистота, захист авторськими свідоцтвами, патентами) сприяють підвищенню конкурентоспроможності виробу.

Забезпечення одних показників, як правило, суперечить виконанню інших. Тому розроблення комплексних показників необхідне для всебічної оцінки якості. Комплексні показники якості враховують декілька одиничних показників.

Одиничний показник якості продукції – показник якості продукції, що відноситься тільки до однієї з її властивостей.

Комплексний показник якості продукції – показник якості продукції, що відноситься до декількох її властивостей.

Інтегральний показник якості продукції – комплексний показник якості продукції, що відображає співвідношення сумарного корисного ефекту від експлуатації або споживання продукції та сумарних витрат на її створення та експлуатацію або споживання.

Показник якості виробу, що відноситься до такої його властивості (чи сукупності властивостей), за якою визначають якість виробу, називають **визначальним** (рис. 14.1).

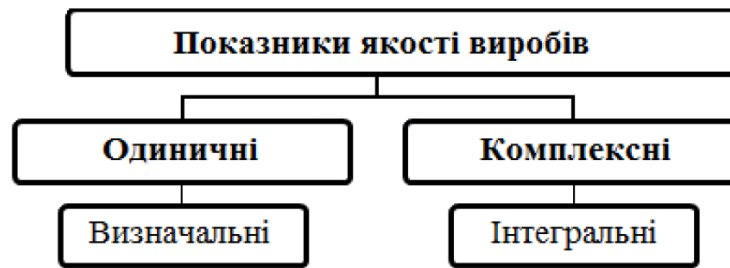


Рис. 14.1. Схема класифікації показників якості виробів за кількістю їх властивостей.

Якщо комплексний показник якості продукції не вдається виразити за допомогою одиничних показників чи об'єктивною функціональною залежністю, то використовують суб'єктивний спосіб утворення середніх опосередкованих показників:

- середній опосередкований арифметичний

$$Q_a = \sum_{i=1}^n q_i Q_i,$$

- середній опосередкований гармонічний

$$Q_g = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

- середній опосередкований квадратичний

$$Q_k = \sum_{i=1}^n q_i^2 Q_i^2,$$

- середній опосередкований геометричний

$$Q_{gm} = \prod_{i=1}^n Q_i^{q_i}.$$

За допомогою коефіцієнтів q враховують вагомість кожного з одиничних показників якості Q . Для визначення (призначення) коефіцієнтів вагомості (значимості) показників властивостей найчастіше використовують експертні методи: рангів, переваг, послідовних і попарних зіставлень. Сума коефіцієнтів вагомості показників всіх властивостей повинна бути величиною постійною і складати 1, 10 або 100.

Середні опосередковані гармонічні показники використовують для значних розсіянь складових показників якості продукції. *Середні опосередковані квадратичні* використовують для способу найменших квадратів, а для

сумування неоднорідних показників якості продукції, включно з різнотипною продукцією, з різними умовами її використання та зі значними величинами розсіяння, використовують *середнє опосередковане геометричне*, що є найпоширенішим у кваліметрії.

У багатьох практичних випадках, зокрема, коли розглядається вартісне енергетичне обладнання, беруть два основних показники: *вартість* і *надійність*. Розв'язок задачі оптимізації параметрів, що характеризують вартість і надійність, ілюструється графіком (рис. 14.2).

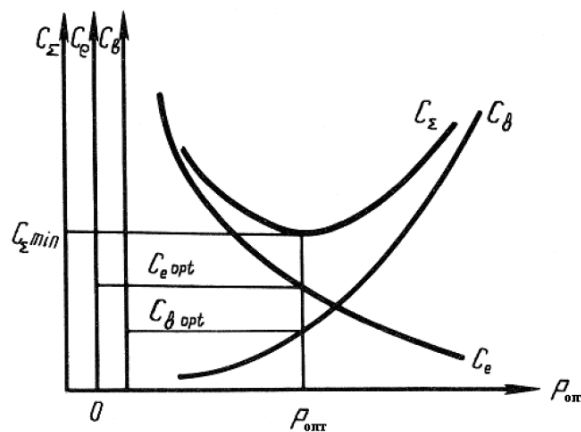


Рис. 14.2. Визначення оптимального рівня надійності виробу: C_b – затрати на виготовлення; C_e – затрати на експлуатацію; C_{Σ} – сумарні затрати; P – надійність (імовірність безвідмовної роботи).

Очевидно, існує деяка оптимальна надійність, до якої слід наближатися, за якої забезпечуються оптимальні значення показників якості. При цьому буде досягнуто найкращого співвідношення затрат на виготовлення й експлуатацію виробу.

14.2. Надійність об'єктів і систем та їхня ефективність

У процесі проектування, як правило, розглядають кілька варіантів конструкції технічного об'єкта чи технічної системи, з яких потім вибирають найкращий. Для їх порівняння вводять критерії ефективності, які можуть бути різними.

Ефективність – це ступінь відповідності об’єкта або системи цільовому призначенню за певних умов експлуатації, а критерієм ефективності є певний кількісний показник, який застосовують для оцінювання і порівняння варіантів об’єктів чи систем.

Розрізняють показники якості функціонування і вихідний ефект системи. **Показники якості функціонування** дають диференціальну оцінку процесу експлуатації виробів (технічні параметри). **Вихідний ефект системи** дає інтегральну оцінку процесу експлуатації виробів (результат використання).

Ефективність залежить від багатьох чинників, у тому числі від надійності складових елементів. При цьому, для системи в цілому визначаються показники надійності та критерій ефективності, а для окремих елементів оцінка ефективності не є обов’язковою.

Наприклад, розглядати ефективність застосування термопари або вакуумметра як складових автоматичної системи керування технологічним процесом (АСК ТП) недоцільно, а визначення їх надійності є актуальним. Таким чином, для окремого технічного об’єкта, що має певне цільове призначення і самостійне застосування (АСК ТП, система передавання даних автоматичного контролю тощо) розглядають і надійність, і ефективність, а для їхніх складових (давач, перетворювач, реле та ін.) — лише надійність.

Показники ефективності можуть бути:

- ймовірнісними,
- інформаційними,
- вартісними.

Розмірністю показників ефективності для інформаційних систем може бути одиниці інформації, для обчислювальних систем – одиниці часу, для автоматичних систем – безрозмірні, адже для них доцільно визначати ймовірність виконання ними заданих функцій.

Зв’язок між критерієм ефективності й надійністю складових об’єкта чи системи можна визначити двома способами.

Перший спосіб. Оцінка зниження ефективності виробу внаслідок недостатньої надійності. Тоді показники надійності окремих елементів або системи в цілому враховують при визначенні показника ефективності. Для цього обчислюють два його значення: бажане (ідеальне) B_0 за умови абсолютної надійності системи та реальне B , яке відповідає фактичній надійності об'єкта чи системи. Різниця або відношення

$$\Delta B = B_0 - B ,$$

$$\Delta B/B_0 = (B_0 - B)/B_0$$

характеризують зниження ефективності через недостатню надійність системи.

Другий спосіб. Показник надійності технічної системи розраховують з оцінюванням змін її ефективності у процесі роботи. Відмовою вважається випадок, коли значення ефективності роботи виявляється меншим від граничного значення. Тобто встановлюється мінімальне граничне значення ефективності роботи системи, після досягнення якого експлуатація припиняється. Причини припинення експлуатації відрізняються від причин, які виникають при досягненні граничного стану. Показники надійності при цьому є характеристиками часу непрацездатного стану, за якого значення показника ефективності роботи є меншим, ніж граничне.

При оцінюванні ефективності системи виділяють дискретні стани, в яких може перебувати система. Тоді показник ефективності доцільно визначати за формулою математичного сподівання:

$$B = \sum_{i=1}^q B_i P_i ,$$

де q — множина станів системи; B_i — умовний показник ефективності, який мала б система, опинившись у i -му стані; P_i — імовірність перебування системи у i -му стані.

Для великої кількості систем (наприклад, АСК ТП та ін.) часто застосовують такі економічні показники ефективності:

1. Прибуток за одиницю часу

$$\Pi = B - W_E ,$$

де B – вихідний ефект, який є доходом за одиницю часу, що отриманий від експлуатації об'єкта чи системи об'єктів; W_E — експлуатаційні витрати за одиницю часу.

2. Термін окупності

$$\tau_{\text{ок}} = \frac{W_k}{B - W_E},$$

де W_k – капітальні витрати, що визначаються в грошових одиницях.

3. Повні витрати за час T_c експлуатації системи

$$W = W_k + T_c (W_E + \Delta B),$$

де ΔB — ураховує зміну ефективності системи при використанні одного та іншого її варіанта. Для однакових систем з різними умовами експлуатації можна вибирати різні показники ефективності.

14.3. Економічні показники надійності

Підвищення безвідмовності та довговічності машин пов'язане, з одного боку, з додатковими матеріальними витратами, а з іншого, з підвищенням ефективності капітальних вкладень, зменшенням витрат на ремонт, підвищенням продуктивності машин.

Критерієм ефективності підвищення надійності може бути сума затрат, пов'язаних з виготовленням і експлуатацією технічного об'єкта, віднесена до терміну його доцільної експлуатації:

$$K_e = \frac{Q_B + Q_e}{T_e},$$

де K_e – економічний показник надійності, грн/год; Q_B – вартість виготовлення нового виробу, грн; Q_e – сумарні витрати на експлуатацію, ремонт, обслуговування; T_e – термін доцільної експлуатації виробу, год.

Цей показник має бути мінімальним, що можна забезпечувати за рахунок раціонального розподілу капіталовкладень між сферами виробництва і експлуатації.

За інших однакових умов, чим дешевший виріб, тим більше затрат припадає на його експлуатацію. Наприклад, при зниженні вартості середньостатистичного електродвигуна на 5% затрати на його експлуатацію зростають на 13%.

Співвідношення між вартістю виготовлення і експлуатації виробу характеризується коефіцієнтом експлуатаційних витрат:

$$K_{ев} = \frac{Q_B}{Q_B + Q_e} < 1,$$

де Q_B – затрати на виготовлення виробу; Q_e – затрати на його експлуатацію;

Вищої надійності виробу завжди досягають за рахунок додаткових затрат, тому часто користуються поняттям “ціна надійності”.

Загальні затрати на виготовлення виробу складаються з постійних затрат Q_P , які не залежать від вимог надійності, та змінних (непостійних) складових затрат Q_H , зумовлених вимогами надійності:

$$Q_{заг} = Q_P + Q_H.$$

Для прогнозування затрат, пов'язаних з підвищенням надійності, часто застосовують метод порівняння з **прототипом** на основі загальних емпіричних залежностей, отриманих у результаті оброблення дослідних даних про ціну надійності. У багатьох випадках така залежність для ціни надійності Q_H має степеневий характер :

$$Q_H = Q_{H0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^a,$$

де Q_{H0} — ціна надійності аналога або прототипу виробу; T_0 – напрацювання на відмову (середній термін експлуатації) прототипу; T – напрацювання на відмову виробу, що проектується; a — емпіричний показник, який характеризує рівень прогресивності виробництва з погляду можливостей підвищення надійності ($a \approx 0,5 \dots 1,5$).

14.4. Основні напрямки підвищення рівня якості енергетичного обладнання

Під підвищенням якості розуміються спрямовані дії виробника обладнання, які спрямовані на підвищення ефективності його діяльності і здійснюваних процесів з метою позитивних змін в характеристиках якості шляхом:

- покращення (підвищення) рівня стандартних показників якості;
- введення нових стандартів з більш високим рівнем якості;
- здійснення інновацій.

Управління якістю обладнання базується на наступних принципах:

- встановленні початкових і майбутніх потреб потенційних споживачів;
- розумінні того, які характеристики продукту отримують найбільш високу оцінку споживача;
- проектуванні продукту відповідно до вимог споживача;
- виготовленні обладнання при повному відтворенні закладених при проектуванні характеристик і параметрів;
- перевірці якості після виготовлення на відповідність технічним вимогам;
- недопущенні поставок продукції з дефектами;
- використанні найменш вартісних способів задоволення вимог споживача;
- підвищенні ефективності технологічних процесів;
- створенні та забезпеченні роботи системи управління якістю.

14.5. Статистичні методи оцінки якості

Статистичні методи управління якістю продукції мають перевагу в порівнянні із суцільним контролем продукції, яка полягає у можливості виявлення відхилення від технологічного процесу не тоді, коли вся партія деталей виготовлена, а в процесі (коли можна вчасно втрутитися в процес і скорегувати його).

Статистичні методи засновані на оцінці показників якості продукції з використання методів теорії ймовірності та математичної статистики. Область застосування статистичних методів надзвичайно широка і охоплює весь життєвий цикл обладнання (проектування, виробництво, використання тощо).

Статистичні методи застосовуються в системах управління якістю і сертифікації продукції (рис. 14.3). Методи математичної статистики дозволяють із заданою ймовірністю проводити оцінку якості виробів. Статистичні методи сприяють скороченню витрат часу на контрольні операції і підвищення ефективності контролю.

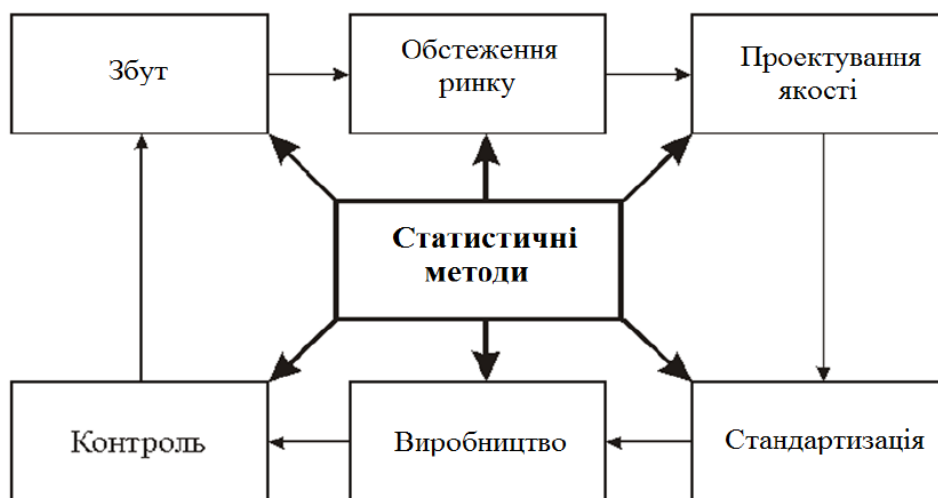


Рис. 14.3. Область застосування статистичних методів.

За допомогою статистичних методів визначають:

- середнє значення показників якості,
- їх довірчі границі та інтервали розподілу,
- закони розподілу показників якості;
- коефіцієнти кореляції.

При проведенні статистичного контролю приймається рішення про приймання або вибракування всієї партії продукції за результатами контролю вибірки. Статистичні методи можна використовувати по всьому життєвому циклу продукції. Вони дозволяють значно скоротити трудовитрати та обсяги

роботи з контролю партій. Це пов'язано з тим, що контролюється від 5 до 15% від усієї партії.

Статистичні методи допомагають систематично знаходити проблеми якості обладнання та вирішувати їх, а також дозволяють визначити, які з проблем носять випадковий або постійний характер. Така систематизація причин дозволяє виявити найбільш проблемні місця в системі управління організації, так звані «вузькі місця» і ефективно побудувати організаційну структуру.

Статистична керованість процесів і прийняття рішень на основі фактів – це основні вимоги, запропоновані міжнародними стандартами ISO 9000 до системи якості, які можуть бути виконані завдяки впровадженню статистичних методів. Найважливішою складовою статистичного управління є здійснення коригувальних заходів у напрямку удосконалення організації. В іншому випадку застосування статистичних методів буде марною витратою ресурсів.

Використовувані в сучасній практиці підприємств статистичні методи:

– методи високого рівня складності (використовуються розробниками систем управління підприємством або процесами; до них відносяться методи кластерного аналізу, адаптивні робастні статистики);

– спеціальні методи (використовуються при розробці операцій технічного контролю, планування промислових експериментів, розрахунки на точність і надійність);

– методи загального призначення.

У розробку останніх яких великий внесок внесли японські фахівці. До них відносяться «Сім простих методів» (або «Сім інструментів якості»), що включають в себе: блок-схему; контрольний аркуш; діаграму причина-наслідок; діаграму Парето; діаграму контролю; гістограму; діаграму розсіювання.

Блок-схема представляє робочий процес, алгоритм або поетапний процес. Вони використовуються для представлення організаційних структур, системи входу, потоку процесів роботи з документами, потоку рахунків-фактур тощо.

Контрольний аркуш використовується для збору даних та інформації у простому форматі. Цей збір даних базується на фактичних фактах та цифрах, а не на будь-яких уявних цифрах та предметах. Контрольний аркуш - це, як правило, перелік питань або проблем у документі чи таблиці. Контрольний аркуш допомагає організації виявити проблеми, які заважають поставити якісний товар.

Діаграма причина-наслідок охоплює всі причини, ідеї та використовує метод мозкового штурму для виявлення найважливішої першопричини проблем.

Діаграма Парето - це стовпчаста діаграма, а також лінійна діаграма, яка графічно узагальнює групу даних. Дані можуть бути пов'язані з вартістю, часом, дефектами тощо. Діаграма Парето надає інформацію, яка стосується найбільшої проблеми процесу.

Діаграми контролю, які також відомі як Статистичний контроль процесів, використовуються для визначення того, чи перебувають процеси в стані контролю. Діаграма управління - це графік, який показує, як процес змінюється з часом.

Гістограма - це графічне зображення, яке показує, розподіл числових даних, який забезпечує необхідну інформацію про форму, розподіл або розповсюдження набору вибірових даних. Гістограма використовується, щоб продемонструвати процес покращення якості, оскільки графік відображає фактичні числові дані.

Діаграма розсіювання - це графічне зображення, яке показує розкид результатів спостережень.

Контрольні запитання

1. Якими є визначальні показники якості енергетичного обладнання?
2. Як формуються комплексні показники якості обладнання?
3. Яким чином враховують показники надійності при визначенні ефективності обладнання?

4. Як визначається економічний показник надійності?

5. Якими є основні напрямки підвищення рівня якості енергетичного обладнання?

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Черноусенко О. Ю., Риндюк Д. В., Пешко В.А. Оцінка залишкового ресурсу та продовження експлуатації парових турбін великої потужності (Частина 3). Київ: НТУУ «КПІ», 2020.- 308 с.
2. Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко. Надійність і довговічність устаткування: Підручник. – К.: НУХТ, 2008. – 574 с.
3. ДСТУ 2860-94 «Надійність у техніці. Терміни та визначення».
4. ДСТУ 3433–96. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення.
5. Wickens C. Engineering Psychology and Human Performance (Second Edition). New York: Harper-Collins, 1992.
6. European organisation for the safety of air navigation. Technical Review of Human Performance Models and Taxonomies of Human Error in ATM (HERA). – 2002. – 134p.
7. Бовсуновський А.П. Дослідження процесу росту кругової тріщини при крутильних коливаннях валопроводу парової турбіни. Вібрації в техніці і технологіях, 2023, № 1 (108), 16-28. <http://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-2>
8. Bovsunovsky A. (2019) Effect of Abnormal Operation of Turbine Generator on the Resource of Steam Turbine Shafting. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 247-254. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_26
9. Edgar J. Gunter. Dynamic analysis of a 1150 MW turbine generator. ASME 2005 Power Conference, April 5–7, 2005, Chicago, Illinois, USA, pp. 437-443. <https://doi.org/10.1115/PWR2005-50142>
10. Чернець М., Невчас, Скварок Ю. Дослідження і підвищення зносостійкості матеріалів та оцінка довговічності і надійності триботехнічних систем. – Дрогобич-Люблін. 2000. – 320 с.
11. ДСТУ 2823-94. Зносостійкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення.

12. ДСТУ ISO 9001-2008. Системи управління якістю. Вимоги.

13. ДСТУ ISO 9004-2018. Управління якістю. Якість організації. Настанови щодо досягнення сталого успіху.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ю.Г. Сухенко, О.А. Литвиненко, В.Ю. Сухенко. Надійність і довговічність устаткування: Підручник. – К.: НУХТ, 2008. – 574 с.

2. Надійність теплоенергетичного обладнання: Конспект лекцій / Укл. Клімов Р.О.– Кам'янське: ДДТУ, 2016. – 65с.

3. Нормування показників надійності технічних засобів: Навчальний посібник / О.М. Васілевський, В.О. Поджаренко.- Вінниця: ВНТУ, 2010.- 129 с.

4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- Аварія – 108
- Акселерометр – 196
- Безвідмовність – 14
- Велосиметр – 195
- Вібродатчик – 195
- Відмова – 19
- Відмова системи теплопостачання
 - повна – 112
 - часткова – 112
- Відносна частота події – 23
- Визначальні випробування – 69
- Випадкова величина – 22
- Випробування – 21, 79
- Втома матеріалу – 97
- Втомне руйнування – 97
- В'язкість руйнування – 162
- Головна функція потоку відмов – 34
- Готовність – 15
- Границя витривалості – 99
- Граничний стан – 37
- Дисперсія – 30
- Діагностика
 - технічна – 12
 - вібраційна – 178
- Довговічність – 14
- Довірча ймовірність – 70
- Ефективність – 237
- Збережуваність – 17

Зношування – 198

- абразивне – 208
- від утомлюваності – 209
- гідроабразивне – 209
- ерозійне – 209
- кавітаційне – 207

Інтенсивність

- відмов – 32
- відновлення – 36

Інформаційне перевантаження – 141

Ймовірність

- відновлення – 35
- події – 23

Кавітація – 206

Квантиль – 30

Коефіцієнт

- варіації – 31
- готовності – 39
- довговічності – 37
- експлуатаційних витрат – 229
- збереження ефективності – 40
- інтенсивності напружень – 161
- оперативної готовності – 40
- технічного використання – 40

Корозія – 202

Кратність резервування – 57

Математичне сподівання – 29

Механіка руйнування – 159

Мода – 30

Надійність – 10

Надійність оператора

- інформаційна – 138
- експлуатаційна – 138
- професійна – 138
- функціональна – 138

Подія – 21

Показники

- ефективності – 226
- якості – 221

Потік відмов – 34

Працездатність – 18

Проксиметр – 185

Режимна надійність

- котла – 114
- турбіни – 114

Резервування – 54

Ремонтопридатність – 14

Ризик

- виготовлювача – 76
- споживача – 76

Середнє

- квадратичне відхилення – 31
- напрацювання до відмови – 34, 72

Середній час відновлення – 36

Середній термін збережуваності – 37

Система

- інформаційна – 127
- ергатична – 126
- технічна – 53
- технологічна – 53

Стрессова реакція – 140
Тертя – 198
Фретинг-корозія – 205
Формула Баєса – 24
Частість настання відмови – 28
Частота відмов – 31
Якість – 221